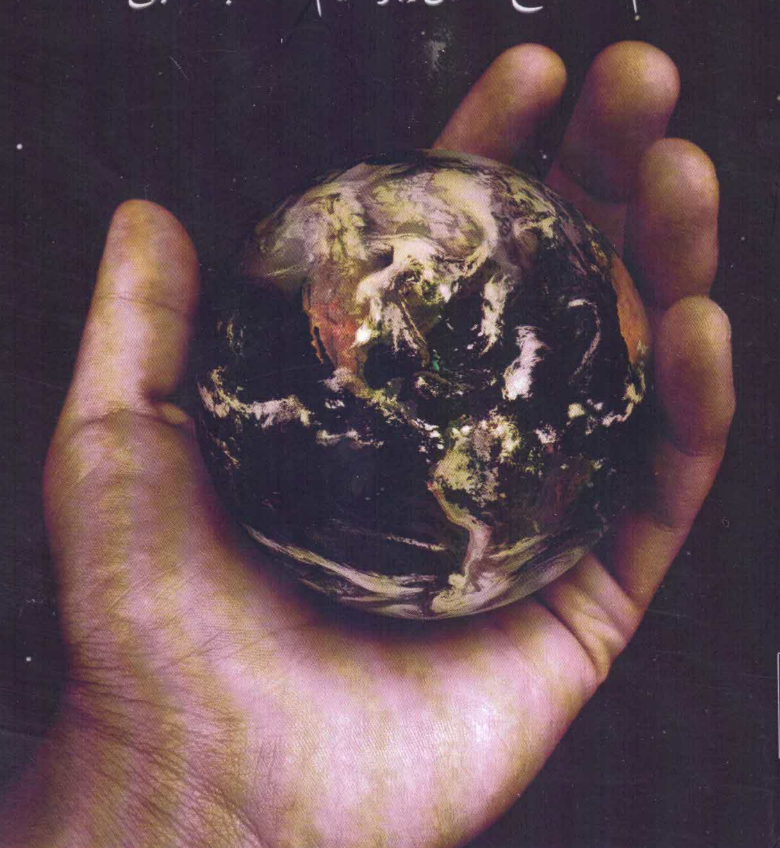
المركز القومى للترجمة

المشروع القومى للترجمة

نحو فهم أشمل للقوى الكونية

تأليف: جون جريبين

ترجمة وتقديم: صلاح الدين إبراهيم حسب النبى



1583



تساءل الإنسان مم تتركب المادة.... جاء جواب ديموقريس بعد آلاف السنين.... تتركب المادة من الذرات.

تساءل الإنسان مم تتركب الذرة..... جاء جواب راذرفورد بعد مئات السنين .... تتركب الذرة من النواة موجبة الشحنة وفراغ كبير حولها به إلكترونات سالبة الشحنة ... وجاء بور ليصنع نموذجًا بديعًا للذرة.

ثم توالت الاكتشافات سريعًا فى القرن العشرين بمعدل متسارع؛ حيث تم اكتشاف البروتون والنيوترون، ثم جاء ما يقرب من مائة جسيم أولى آخر، وكان لابد من نظرية تفسر أصل الجسيمات الأولية ... وكانت نظرية الأوتار.

وتساءل الإنسان لماذا تسقط الأشياء على الأرض... وجاء جواب نيوتن بنظرية الجاذبية...

ثم أضاف أينشتين أن الجاذبية ما هى إلا تغيرات فى خواص الفراغ تحدثه الأجسام، وحاول أينشتين توحيد كل قوى الطبيعة فى نظرية واحدة ولم ينجح.

والآن لدينا نظرية تفسير قوى الطبيعة وأصل المادة والطاقة وربما أصل الكون..

يحكى هذا الكتاب بأسلوب بسيط للغاية قصة العلم فى محاولته فهم ألغاز الطبيعة وفك طلاسمها وهى قصة مليئة بالإثارة والتشويق....

تصميم الغلاف: عمرو قاسم

نحو فهم أشمل للقوى الكونية

المركز القومى للترجمة
إشراف : جابر عصفور

- العدد: 1583
- نحو فهم أشمل للقوى الكونية
- جون جريبين
- صلاح الدين إبراهيم حسب النبى

هذه ترجمة كتاب :

In search of superstrings

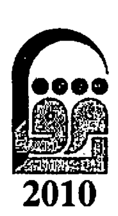
By: John Gribbin

شارع الجبلاية بالأوبرا - الجزيرة - القاهرة . ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ - ٢٧٣٥٤٥٢٦ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤

El-Gabalaya St., Opera House, El-Gezira, Cairo.
E.Mail:egyptcouncil@yahoo.com Tel.: 27354524 - 27354526 **Fax:** 27354554

نحو فهم أشمل للقوى الكونية

تـألـيـف : جـون جريبين
ترجمة وتقديم : صلاح الدين إبراهيم حسب النبى



2010

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

جريبين، جون.
نحو فهم أشمل للقوى الكونية/تأليف: جون جريبين؛
ترجمة وتقديم: صلاح الدين إبراهيم حسب النبى.
ط١، القاهرة: المركز القومى للترجمة، ٢٠١٠
٢٠٤ ص ؛ ٢٤ سم
١- الفيزياء الكونية.
(أ) حسب النبى، صلاح الدين إبراهيم (مترجم ومقدم)
(ب) العنوان ٥٣٩,٧

رقم الإيداع ٢٠٠٩/١٦٩٥٦
الترقيم الدولى I.S.B.N. 978 - 977 - 479 - 548 - 6
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

المحتــويات

مقدمة المترجم

افتتح أضخم معمل للجسيمات فى العالم بالقرب من جنيف فى ٩ سبتمبر ٢٠٠٨، وقد تكلف إنشاء هذا المعمل حوالى ٦ بليون يورو واستغرق تصميمه ٥ سنوات وبلغ قطر دائرته ٢٧ كم، وسمى صادم الهادرونات الضخم Large Hadron Collider وحضر افتتاحه علماء من ثمانين دولة، ليس من بينها دول عربية للأسف وهو ما يدعو للأسف عدة مرات، وليس مرة واحدة. إن هذا الحدث يعتبر من أهم الأحداث العلمية فى القرن العشرين حتى الآن، وليس من المحتمل أن يتم بناء معجل مثيل له. كما أن هذا المعجل محل آمال كبيرة فى إثبات صحة العديد من النظريات حول نشأة الكون، وحول ما هية المادة وماهية الجسيمات المكونة للذرة، وعلى الرغم من يقينى أن هناك العديد من العلماء العرب والمصريين المتميزين، فإن هناك قصوراً شديداً فى الثقافة العلمية التى من المفترض أن توجه إلى كل فرد ليس متخصصاً فى العلوم، ولهذا فإن الكتب الجادة التى تتعلق بتبسيط العلوم الحديثة والنظريات الكونية وتلك الخاصة بتركيب المادة تلقى رواجاً هائلاً فى العالم الغربى، لكنها قليلة أو نادرة فى عالمنا العربى.

هذا الكتاب ليس كتاباً موجهاً للمتخصصين، ولكنه يحكى بأسلوب واضح ومفهوم وبعيد كل البعد عن الصياغات الرياضية قصة محاولات الفيزياء نحو فهم أعمق للكون والقوانين التى تحكم عالم الجسيمات متناهية الصغر داخل الذرة وتحكم المجرات والكون أيضاً. و هذا السعى نحو نظرية واحدة للقوى الطبيعية الذى بدأ منذ بدايات القرن التاسع عشر يبدو أنه قد وصل إلى الخطوة قبل النهائية. إن الباحث فى الفيزياء كمن يبحث عن طريق للخروج من وسط غابة كثيفة مظلمة لا يكاد يتحسس طريقه تحت قدميه، ويسير فى مسارات قد تصيب تارة وقد تفشل تارات أخرى، ولكن طريقة عرض

الكتاب تعكس تمكن المؤلف من المادة العلمية المتاحة وتضفى عناصر تشويق تجعل القارئ مستمتعًا بمتابعة القصة.

يعتبر المؤلف جون جريبين أحد العلماء المعاصرين، وقد تميزت كتبه فى تبسيط الفيزياء بأنها تحقق أعلى مبيعات دائمًا؛ وذلك لقدرته الفريدة على تناول الموضوعات العلمية المعقدة بشكل بسيط مع إدراج بعض الأمثلة التوضيحية التى نشاهدها فى الحياة العادية.

لم يكن هدفى من ترجمة هذا الكتاب تزويد القارئ بمعلومات علمية تزيد من أفق معرفته فقط، وإن كان هذا الهدف ضروريًا ومهمًا ولكنه ليس كافيًا. إن أملى أن يترسخ فى ذهن القارئ طريقة التفكير العلمية. وهى تتلخص فى وجود ظواهر طبيعية نحاول أن نفهمها فنقوم بوضع تفسير لها (وهو ما نسميه نموذج نظرى لتفسير الظاهرة) يشرح لنا سبب الظاهرة والقوانين الحاكمة لها وكيف نؤثر فيها ونتحكم فيها. وأى نموذج نظرى أمامه تحديان، الأول: أن يقدم تفسيرًا للظاهرة لا يتعارض مع الحقائق المعروفة، وثانيهما: أن يقدم لنا تنبؤات نستطيع التحقق منها عمليا عن طريق التجربة و/أو الملاحظة، وبالتالى نحكم على النموذج بأنه يصلح كنظرية فيزيائية.

حافظت فى الترجمة على السياق العربى وروح النص الأصلى والحرفية فى الترجمة كلما أمكن ذلك، على أنه فى بعض الأحيان نتنازل عن حرفية الترجمة فى سبيل سلامة النص العربى. كما أضفت بعض الملاحظات التوضيحية، وهى الموضوع أمامها علامة (*) أما ملاحظات المؤلف فموجودة كما هى، وهى معرّفة بالأرقام (١)، (٢)، وهى ذات الأرقام فى النص الأصلى. كما يوجد كشاف فى نهاية الكتاب يضم ما ورد من أسماء ومصطلحات باللغتين العربية والإنجليزية والصفحة التى ورد فيها الاسم أو المصطلح أول مرة، وهو بذلك يعتبر معجما لما ورد فى الكتاب من مصطلحات علمية بعض منها لم أعثر له على ترجمة متفق عليها فقمت بمحاولة ترجمته.

د. صلاح الدين إبراهيم حسب النبى

تصدير الطبعة الثانية

نظرية (M) والمعروفة سابقًا بالأوتار

كان الموضــوع الساخن فى السـنوات الماضية فى مجال البحـوث المتقـدمة فى الفيزياء، والذى لاقى شعبية كبيرة هو ما يسمى نظرية – م (M-theory) أو الأغشية وقد تسمى أحيانًا "نظرية كل شىء" النهائية، التى تصف كل الجسيمات المادية وكل القوى الطبيعية فى حزمة واحدة. توجد ادعاءات قوية بأن الأغشية قد تكون مسئولة عن بداية الكون نفسه. إن أحد هذه الادعاءات يقول إن نظرية – م هى نظرية جديدة تمامًا بزغت فى عقول الفيزيائيين من الفراغ. ولكنها فى الحقيقة هى تنويعة جديدة من لحن قديم، هى ما انتهى إليه اتجاه من البحوث بدأ منذ أكثر من مئة عام. كانت تسمى فى البداية نظرية الأوتار. نظرية – م تستمد أهميتها من نسبها العريق، وأنها بالفعل ليست نظرية عشوائية خرجت من الفراغ. لقد انصبت جهود الفيزيائيين والرياضيين فى القرن العشرين والقرن الواحد والعشرين فى اتجاه البحث عن الأوتار الفائقة والتماثل ونظرية كل شىء، وترجع أصول هذه البحوث إلى القرن التاسع عشر. والقصة التى أحكيها فى هذا الكتاب تدور حول كيفية بناء الأساس المتين لنظرية – م أكثر منها حول أقصى ما انتهت إليه الدول المتقدمة فى العلم اليوم. هى تدور حول اكتشاف اللبنات الأساسية فى تركيب العالم المادى، فيزياء الكم، ماهية الجسيمات والمجالات، الحاجة إلى نظرة واحدة موحدة للفيزياء، وأخيرًا فى معنى التماثل. بقدر الإمكان نستبعد التصورات ونلتزم بالحقائق المؤكدة والمثبتة – مثل حقيقة أن الإلكترون يتصرف كجسيم وكذلك كموجة فى وقت واحد. إن عدم اليقين هو سمة أساسية من سمات عالم الجسيمات الدقيقة. إن الجسيمات المادية مركبة من أوتار وإن هناك (عالمًا) آخر (عالم الظل) متداخلاً مع العالم الذى نعرفه.

ولكن التصورات الذهنية هى القوة الدافعة للفيزياء النظرية، وما نعتبره خيالاً اليوم قد يصبح حقيقة مؤكدة غداً. نظرية – م هى نتاج التطور فى نظرية الأوتار، وإذا ما استطاعت أن تفسر لنا أصل الكون، فإن هذا سوف يكون تقدمًا مثيرًا فى مسيرة العلم. وحتى أثير شهيتك وأعطيك فكرة عن أهمية ما سوف تجده فى نهاية هذه القصة، فسوف نورد هنا تقريراً بلغة سهلة غير متخصصة للطريقة التى تفسر بها نظرية – م الانفجار الكونى الهائل.

يتألف الكون الذى نعيش فيه من ثلاثة أبعاد للمكان وبعد للزمان، وهذه المجموعة وصفها بدقة العالم الفيزيائى ألبرت أينشتاين وتعرف بنظرية النسبية العامة. العلماء الذين جاءوا بعد أينشتاين يعتقدون الآن (لأسباب سوف تتضح من خلال قراءتك للكتاب) أن أفضل تفسير لهذا الكون المرئى رباعى الأبعاد يتطلب وجود أبعاد أخرى (ستة أو سبعة أبعاد) خفية عنا بطريقة بارعة. وكما سوف نرى هناك دلائل قوية على صحة هذه الفكرة. إن أحد أهم مميزات أى قاعدة فكرية صلبة أنها تعد نقطة انطلاق لأفكار أخرى، وإحدى هذه الأفكار تقترح أن العالم ثلاثى الأبعاد (إذا تركنا جانبًا بعد الزمان) موجود ضمنيًا داخل بعد آخر، هذا البعد متعامد مع الأبعاد الثلاثة المحسوسة للمكان، ومن غير الممكن لأى إنسان أو جهاز حتى الآن الشعور بهذا البعد. إذا كانت الأفكار المشروحة فى هذا الكتاب صحيحة فقد يكون هذا هو البعد الحادى عشر، ولكن هذا ليس مهماً هنا.

إحدى أهم نتائج هذه الفكرة أنه من الممكن وجود أكوان أخرى ثلاثية الأبعاد، ولكنها منفصلة عنا فى البعد الإضافى. ويمكننا تقريب هذه الفكرة بتشبيه بسيط فمثلاً الكتاب يتكون من صفحات كل منها تعتبر عالمًا ذا بعدين، ولكنها منفصلة عن بعضها فى البعد الثالث العمودى عليها. يطلق الفيزيائيون على هذه التركيبات لفظة برين (غشاء) وهى مشتقة من الإنجليزية membrane. فمثلاً الخط (الوتر) الرفيع جداً هو برين–١ أى برين ذا بعد واحد، أما الصفحة ثنائية الأبعاد والتى تمتد إلى ما لا نهاية فتسمى برين –٢ والكون الثلاثى الأبعاد برين–٣، وهكذا فنحن نعيش فى برين –٣، ويوجد بعد إضافى

ممتد إلى ما لا نهاية، ومن الممكن أن يوجد عدد لانهائى من عوالم الأغشية (برين-٣) تماماً كصفحات كتاب مرئية فوق بعضها. ويمكننا تسميته الكون المتعدد. وفكرة أخرى تقول إن قوانين الفيزياء قد تكون مختلفة فى الأكوان المختلفة؛ فمثلاً فى بعض الأكوان قد تكون الشموس أكثر لمعاناً ولكن لفترة حياة أقصر، وقد لا تكون هناك شموس فى بعض الأكوان على الإطلاق.

إن أحد أسباب ترجيح هذه الفكرة هى أنها تجيب عن التساؤل، لماذا يبدو الكون الذى نعيش فيه مناسباً جداً لشكل حياتنا؟. العديد من الفلكيين ومن بينهم مارتن ريز استهواهم البحث فى هذه الإشكالية، وهم عادة ما يشيرون إلى العالم على أنه (عالم أم الشعور)(*) فى صور متعددة من البحث فى السبب أن الأرض والكون مناسبات جداً للحياة، تماماً كما فى قصة الدببة الثلاثة عندما تكون العصيدة مناسبة جداً للطفل[١] فلا هى باردة ولا هى ساخنة. والحل الذى تتيحه فكرة الكون المتعدد مشابه تماماً للقصة. فكما اختارت "أم الشعور" طبق العصيدة المناسبة لها، وتركت الأطباق الأخرى، فإن الحياة قد اختارت الكون المناسب لها.

ما السبب فى إثارة هذا الاحتمال؟ السبب كما صاغه عالم الفلك ألفريد هويل، يبدو لنا الكون نتيجة عملية تركيب بنائية؛ حيث إن العديد من سمات الكون وخصائصه وكذلك القوانين الطبيعية فى حد ذاتها تبدو كما لو كانت مصممة لتناسب وجودنا. والمثال الأشهر الواضح - والذى أشار إليه هويل نفسه - هو خواص ذرة الكربون فنواتها مصممة لكى ينتج الكربون من الهليوم فى النجوم. ولو تغيرت هذه الخواص قليلاً بنسبة مئوية ضعيفة لما أمكن وجود الكربون فى العالم (ولا ذرات أثقل من الكربون). وحيث إننا مصنعون من جزئيات تدخل فيها ذرات الكربون فإن هذا التغير لو كان قد حدث لأثّر فى مسار الحياة تأثيراً خطيراً.

(*) أم الشعور هى زهرة ذات زوائد صفراء وتسمى "Goldilocks" وترمز إلى الشخصية الخيالية فى قصة الدببة الثلاثة؛ حيث تدخل منزلهم وتعبث فى أشيائهم، ولكنها تختار طبق الأكل المعد للطفل حيث إنه مناسب جداً لها، وبالتالى فهى ترمز للشىء المناسب جداً.

(١) أصبح هذا فرعاً من العلم يسمى علم طبائع البشر الكونية anthropic cosmology.

يوجد تفسيران محتملان للإشكالية السابقة. إما أن الكون مصمم خصيصًا لحياتنا، أو أن هناك أكوانًا عديدة وأن الحياة يمكنها الوجود فى الأكوان المشابهة فقط لكوننا. فى تشبيه لطيف لمارتن ريز إنه كالفارق بين أن تقوم بتفصيل بدلة على مقاسك أو أن تختار ما تناسبك من بين عدة بدل جاهزة. فإذا كان هناك عدد لانهائى من البدل فمن المؤكد أن إحداها سوف تكون مناسبة.

ليس هذا هو السبب الوحيد لقبول فكرة عالم البرينات (جمع برين). الملاحظات التى تؤكد تمدد الكون. وكذلك إشعاع الميكروويف الذى يملأ الكون وينتشر فى جميع الأنحاء ويُظن أنه من بقايا الانفجار الكونى العظيم. مما يشير بقوة إلى أن الكون بدأ ككرة صغيرة جدًا من الطاقة العالية جدًا، والتى دخلت فى طور سريع جدًا من التمدد (كدالة أسيّة) ثم فى طور بطيء من التمدد؛ حيث تبتعد المجرات عن بعضها البعض كنتيجة لزيادة المسافات البينية. وفكرة الكون المتمدد تنجح فى شرح لماذا يبدو الكون متشابها فى كل الاتجاهات، وكذلك لماذا توجد أشكال مختلفة بحجم المجرات موزعة فى الكون بالشكل الذى نراه. ومن ناحية أخرى فإن السؤال المحير هو: ما الذى بدأ التمدد فى المقام الأول؟.

الفيزيائيون المؤيدون لنظرية البرين يعتقدون بأنه إذا ما اقترب عالمان (كونان) خاويان من فصيلة برين-٣ فى الكون المتعدد - من بعضهما البعض، كمثل صفحات الكتاب حين تضرب بعضها عندما نغلق الكتاب، فإن قوى الجاذبية، والتى تتسرب فى اتجاه البعد الإضافى سوف تعمل على جذبهما معًا بقوة كبيرة جدًا. مما سوف ينتج ومضة هائلة من الطاقة من التصادم، وهى التى تبدأ التمدد، وكذلك توفر المادة الخام (تذكر اكتشاف أينشتاين بأن المادة والطاقة يتحولان من صورة إلى أخرى) لتشكيل العالم المادى من مجرات وشموس وكواكب والناس فى الكون برين-٣ والذى بدأ فى التمدد. وفى نفس الوقت يبدأ الكونان برين-٣ الأصليان فى الابتعاد عن بعضهما البعض فى اتجاه البعد الإضافى بينما يبدأ الكون أو الكونان المتمددان فى البرودة كما فى الكون الذى نعيش فيه. وفى استكمال آخر للفكرة فإن الكونين (برينيين -٣)

سوف يقتربان من بعضهما البعض مرة أخرى عندما يبردان تماما ويصبحان خاويين بحيث تعود الكرة مرة أخرى ويبدأ التمدد من جديد وتبدأ الحياة مرة أخرى وهكذا. مثل القصة الخرافية لطائر العنقاء وهذه الفكرة تجعل التساؤل عن بداية ونهاية الزمن غير وارد.

قد يبدو هذا كقصص الخيال العلمي، وكذلك كل الأفكار العلمية الجديدة تبدو فى بدايتها كالخيال العلمي. وكما أوضح لورانس كراوس من جامعة Case Western Reserve أن العديد من التصورات العلمية تتحول فعليا إلى قصص خيالية. وفى هذا السياق من المحتمل أن تكون فكرة عالم البرين غير صحيحة أكثر من كونها صحيحة. ولهذا لم نتناولها فى هذا الكتاب. وما أود الإشارة إليه أن هذه الأفكار تخرج من قاعدة صلبة بحيث عندما تقرأ فى الأخبار عن (الأكوان العنقائية أو الأنثروبولوجيا الكونية) فسوف تعلم من أين تاتى هذه الأفكار. ولكن من المفيد التذكر أنه إذا رجعنا إلى الربع الأخير من القرن التاسع عشر، فإن أفكاراً كالتركيب الذرى للمواد كانت تعد من قبل القصص الخيالية للعديد من الناس. وفعليًا فكل شيء سوف تقرؤه فى هذا الكتاب كان يبدو فى وقت من الأوقات كالخيال العلمي، ثم أصبح يشكل جزءاً من فهمنا عن الطريقة التى يعمل بها العالم المادى. القصة التى أنوى سردها هى قصة حدثت فى القرن العشرين، ولكن من المفيد أن نسترجع أحداث القرن التاسع عشر التى جعلت العجلة تدور، والتى قادت مباشرة إلى التصورات الخاصة بالعالم البرينى والأكوان المتعددة، ومن يدرى إلى أين سوف تقودنا فى العقود القادمة.

جون جريبين

نحو فهم أشمل للقوى الكونية

(البحث عن الأوتار الفائقة

التماثل، الأغشية، ونظرية كل شىء)

مقـــدمـة

العـالم المـــادى

شهد القرن التاسع عشر تطويراً للنظرية الذرية التى ترجع إلى عصر ديموقريطس فى القرن الرابع قبل الميلاد، والتى تقول إن جميع المواد مكونة من ذرات، والذرة هى أصغر لبنة فى تكوين المواد وتشبه كرة البلياردو. وهى من الصغر بحيث إذا وضع مئة مليون ذرة بجانب بعضها سوف يصل طولها إلى سنتيمتر واحد. وجميع ذرات المادة الواحدة متشابهة، ولكن تختلف ذرات المواد المختلفة فى خواصها. فذرة الكربون تختلف عن ذرة الأوكسجين وكل منهما تختلف عن ذرة الحديد سواء فى الوزن أم الحجم، وتتحدد خواص المواد طبقا لخواص الذرات المكونة لها. وعندما تتحد المواد اتحاداً كيميائياً، فإن الذرات المكونة لها تشكل مجموعة متشابكة من الذرات يطلق عليها الجزئيات؛ فعلى سبيل المثال عندما يحترق الفحم تتحد ذرات الكربون المكونة له مع ذرات الأكسجين (كل ذرة كربون تتحد مع ذرتى أكسجين) مكونة جزىء ثانى أكسيد الكربون.

ولكن بينما رسخت فكرة الذرة قام العالم الإنجليزى ج. ج طومسون عام ١٨٩٧ من معمل كافيندش فى كامبريدج بتجربة رائدة؛ حيث قام بتفتيت الذرة لأول مرة فى التاريخ وبدأ فى دراسة الفتات الناتج؛ حيث وجد أنها ذات شحنة كهربية سالبة كما أن وزنها أخف بكثير جداً من الذرة، وقد سمى هذا الفتات بالإلكترونات وقد تركت وراءها باقى الذرة ولها شحنة كهربية موجبة وأثقل وزنا وسميت بالأيونات. وقد وجد طومسون أن الإلكترونات الخارجة من ذرات المواد المختلفة لها دائماً نفس الخواص.

كان اكتشاف طومسون بمثابة صدمة لعلماء الفيزياء؛ حيث كان قد استقر لديهم أن الذرات صلبة ولا تتفتت. وعندما تم اكتشاف المواد المشعة حصل العلماء على أداة

جديدة لدراسة تركيب الذرة، كما ثبت أن هناك جسيمات أثقل بكثير من الإلكترونات تنتج من كسر الذرة. ثم أوضح العالم النيوزيلندى أرنست رازرفورد من جامعة ماكجيل فى مونتريال وبالتعاون مع فريدريك سودى مع بداية القرن العشرين - أن الإشعاعات الصادرة من المواد المشعة إنما هى نتيجة لتحول ذرات هذه المواد إلى ذرات لعناصر أخرى، وينتج عن هذا التحول إطلاق نوعية من الأشعة أطلق عليها رازرفورد أشعة ألفا وأشعة بيتا. وبالدراسة تبين أن أشعة بيتا هذه هى إلكترونات سريعة جداً لها نفس الخواص التى سبق واكتشفها طومسون. أما أشعة ألفا فقد وجد أنها جسيمات سريعة ولكنها أثقل كثيراً من الإلكترونات وذات شحنة موجبة كما أن وزنها أثقل أربع مرات من ذرة الهيدروجين (أخف العناصر المعروفة على الأرض) ولها شحنة موجبة مقدارها وحدتان. وهذا الوزن وهذه الشحنة تماثل تماماً ذرات الهليوم ثانى العناصر بعد الهيدروجين، ولكن بدون الشحنات السالبة (الإلكترونات). وقد استخدم رازرفورد أشعة ألفا كقذائف يتم تسليطها على الذرات المختلفة لمعرفة مكوناتها؛ حيث تتمتع هذه القذائف بكتلة كبيرة نسبياً وسرعة عالية.

تابع رازرفورد أبحاثه (فى جامعة مانشستر فى إنجلترا) حيث وجد مع فريق من العلماء هناك أنه بتسليط أشعة ألفا (جسيمات ألفا) على رقيقة معدنية أن نسبة كبيرة جداً من هذه الجسيمات تمر من خلال الرقيقة بدون أى تأثير، ولكن أحياناً ينعكس جسيم من الرقيقة المعدنية. فسر رازرفورد هذا بأن الذرة مكونة من نواة صلبة موجبة الشحنة، وحولها فضاء كبير تدور فيه الإلكترونات السالبة الشحنة. وهذا النموذج الأساسى للذرة تم إعلانه عام ١٩١١ وما زال يدرس فى المدارس حتى الآن.

وطبقاً لملاحظات رازرفورد، فإن غالبية كتلة الذرة مركزة فى مركزها والتى أسماها نواة (Nucleus) أما الإلكترونات السالبة فتدور فى سحابة حول النواة، وحيث إن الذرة متعادلة كهربياً فإن النواة لها شحنة موجبة تعادل شحنة الإلكترونات. أما جسيمات ألفا فهى أجزاء تفتتت من ذرات المواد المشعة أثناء تحولها. وهى فى الحقيقة أنوية ذرات الهليوم. وحينما تصطدم بسحابة الإلكترونات للذرة فإنها تفسح لنفسها طريقا وتمضى فى طريقها بدون تأثير. ولكن الإلكترونات تحمل شحنة كهربية سالبة،

وحيث إن الذرة متعادلة كهربيا فيجب أن تتركز الشحنة الموجبة مثل الكتلة فى نواة الذرة. فإذا اقتربت جسيمات ألفا الموجبة من الأنوية الصلبة الموجبة فإنها ترتد للخلف نتيجة للتنافر بين الشحنات الموجبة.

وقد أيدت الدراسات والتجارب صحة فروض راذرفورد؛ حيث تبين أن النواة لا يزيد حجمها عن جزء من جزء من مئة ألف جزء من حجم الذرة. أما باقى حجم الذرة فتحتله سحابة الإلكترونات الخفيفة الوزن ذات الشحنة السالبة. وفى لغة الأرقام يمكننا أن نقول إن قطر النواة حوالى ١٠-١٢سم(*) فى حين أن قطر الذرة حوالى ١٠-٨ سم. وللمقارنة فإذا تخيلنا أن الذرة تحتل حجما مساويا لقاعة كارنيجى(**) فإن النواة سوف تكون فى حجم حبة الرمل.

طبقًا لنظرية راذرفورد فإن المادة تتكون من ذرات، وتتكون الذرة من عدد من الإلكترونات السالبة فى سحابة محيطة بالنواة التى لابد أن تحتوى على جسيمات موجبة الشحنة سميت بالبروتونات، ووزن البروتون حوالى ٢٠٠٠ مرة ضعف وزن الإلكترون وله شحنة مساوية للإلكترون، ولكنها موجبة وليست سالبة. وعلى ذلك فعدد البروتونات فى الذرة مساوى لعدد الإلكترونات حتى تكون متعادلة، ولكن كيف تلتصق البروتونات بعضها بالبعض الآخر داخل النواة وجميعها لها شحنة موجبة، وكيف تتغلب على قوى التنافر الكهربية بينها. وكما سنرى لاحقًا فإنه توجد قوة أكبر بكثير من القوة الكهربية، ولكنها غير محسوسة على المسافات الكبيرة، ولا يظهر تأثيرها إلا داخل النواة وهى التى تربط البروتونات بعضها بالبعض الآخر وتتغلب على القوة الكهربية. فى خلال العشرين عاما التى تلت نظرية راذرفورد راود العلماء شك كبير فى أنه من المحتمل وجود جسيم جديد داخل نواة الذرة مساوى للبروتون تقريبًا فى الوزن ولكنه متعادل كهربيًا.

(*) ١٠-١٢ تعنى علامة عشرية متبوعة بعدد اثنى عشر صفرا ثم واحد.

(**) إذا تخيلنا أن الذرة تحتل حجمًا مساويًا لملعب كرة القدم فإن النواة سوف يكون حجمها مقاربًا لحبة الفول السودانى.

إن وجود مثل هذا الجسيم يقدم حلولا لكثير من الأسئلة، مثل وجود ذرات لنفس العنصر، ولكنها ذات أوزان مختلفة بالإضافة إلى أن هذا الجسيم سوف يكون عاملا مساعداً للتغلب على التنافر بين البروتونات داخل النواة.

ترتبط الخواص الكيميائية بسحابة الإلكترونات المحيطة بالنواة حيث إنها هى واجهة الذرة التى تتعامل مع الذرات الأخرى كيميائيًا، وعلى هذا فإن الذرات التى تحتوى على عدد متساوٍ من الإلكترونات لها نفس الخواص الكيميائية، وبالتالى فإن أنويتها لها نفس العدد من البروتونات. ولكن قد تحتوى الذرات المتماثلة كيميائيًا على عدد مختلف من الجسيمات المتعادلة، وهى تكون بهذا نظائر للمادة؛ أى أن لها نفس الخواص الكيميائية، ولكن الوزن الذرى قد يختلف، وقد أطلق على هذه الجسيمات المتعادلة كهربيًا والتى لها كتلة مقاربة لكتلة البروتون اسم نيوترون.

والآن أصبحنا على دراية كافية بأن العناصر الموجودة فى الطبيعة تنتهج هذا النظام البديع. الهيدروجين تتكون ذرته من نواة بها بروتون واحد وإلكترون واحد فى السحابة الإلكترونية، وهى بذلك أبسط الذرات المعروفة. أما الكربون فإن له أشكالاً كثيرة، ولكن الشكل الغالب تتكون ذراته من ستة بروتونات و ستة نيوترونات فى النواة وستة إلكترونات فى السحابة المحيطة بالنواة. وذرة الكربون لها أهمية فائقة؛ حيث إنها هى الأساس فى تركيب الأنسجة الحية. ولكن يوجد العديد من العناصر التى تحتوى أنويتها على عدد أكبر من الجسيمات (نيوكليونات)، فالحديد على سبيل المثال تتكون نواته من ٢٦ بروتونًا و٣٠ نيوترونًا على أنه توجد بعض نظائر الحديد تختلف فى عدد النيوترونات. أما اليوارنيوم فتحتوى نواته على ٩٢ بروتونًا و١٤٣ نيوترونًا فى النظير المشع والمسمى يوارنيوم ٢٣٥ والذى يستخدم كمصدر للطاقة النووية.

ويعتبر الحديد ٥٦ من أكثر الذرات ثباتًا، ويقع فى مكان متوسط من سلسلة العناصر. أما العناصر الخفيفة مثل الأكسجين والكربون والهيدروجين والعناصر الثقيلة مثل النيكل والكوبالت واليورانيوم فإنها أقل ثباتا. ويمكن تمثيل ذلك بأن الذرات

الثقيلة جداً والخفيفة جداً تحتل قمتى جبلين بينهما وادٍ منخفض، وتحتل العناصر الثابتة مثل الحديد قاع الوادى. فإنه من السهل أن تقذف كرة من أعلى الجبل إلى قاع الوادى، ولكن من الصعب قذف كرة من الوادى إلى قمة الجبل. وطبقًا لهذا التشبيه فإنه من الممكن قذف الأنوية الثقيلة لتنقسم إلى أنوية عناصر أكثر ثباتًا، ويصاحب ذلك انطلاق طاقة كبيرة هى الطاقة النووية. وعلى الطرف الآخر، فيمكن أيضًا دمج الأنوية الخفيفة لتصبح أنوية أثقل وأكثر ثباتًا مع إطلاق كميات كبيرة من الطاقة والانشطار النووى الذى يستخدم فى المفاعلات النووية والقنابل النووية. أما الاندماج النووى فقد استخدم مع ذرات الهيدروجين التى تندمج لتنتج ذرات الهليوم، وهى الطاقة المستخدمة فى القنابل الهيدروجينية كما تستخدم فى النجوم ومنها الشمس. وإذا عدنا للتطور التاريخى السابق فإنه لم يكتشف النيوترون إلا فى عام ١٩٣٢ بواسطة جميس شادويك وهو تلميذ راذرفورد فى كافيندش عندما أصبح الأخير مديراً للمعمل، حيث قام شادويك بإجراء عدة تجارب أثبتت وجود النيوترونات.

وعلى هذا فإن الصورة التى يعرفها معظم المتعلمين عن تركيب الذرة من حيث كونها تتألف من بروتونات ونيوترونات فى النواة وإلكترونات تدور حولها – ترجع إلى نحو خمس وستين عامًا(*). ومنذ ذلك الوقت حتى الآن حدثت تطورات ضخمة فى مفهومنا لتركيب الذرة مما أدى إلى أن تتحول هذه الصورة البسيطة إلى صورة غاية فى التعقيد، ثم بدأت عملية تبسيط جديدة للصورة؛ حيث ظهرت جسيمات كثيرة ثم بدأت مرحلة إعادة النظام إلى عالم الجسيمات الدقيقة. وهذا الكتاب هو رحلة فى عالم الجسيمات الدقيقة؛ حيث إن الكثير من علماء الفيزياء مقتنعون بأنه من الممكن تفسير جميع القوى فى الكون وداخل الذرة من خلال نظرية واحدة قد تسمى "نظرية جميع الأشياء" وتضم ظاهرة التماثل الفائق المعروفة باسم "Super symmetry" ويطلق عليها "SUSY".

(*) صدرت الطبعة الأولى لهذا الكتاب عام ١٩٩٧م.

إن قصة البحث عن سوزى "SUSY" قد بدأت مع بدايات القرن العشرين عندما وجد العلماء أن الجسيمات الدقيقة مثل الإلكترونات مثلاً لا تتبع قوانين الفيزياء التقليدية التى بدأت مع نيوتن منذ ما يقرب من ثلاثة قرون، هذه القوانين تتبعها كل الأجسام الكبيرة التى نلاحظها فى حياتنا العامة كذلك الكواكب والنجوم، لكن الجسيمات الدقيقة لها قوانين أخرى سميت بقوانين الميكانيكا الكمية حيث لا نستطيع تحديد موقع هذه الجسيمات بدقة عالية جداً، لكن يمكننا تحديد احتمالات وجودها.

الفصل الأول

فيزياء الكم للمبتدئين

قبل بداية القرن العشرين نظر علماء الفيزياء إلى العالم على أنه مكون من شيئين أساسيين؛ أولهما: المواد وتتكون من ذرات وجزيئات، وهى أشياء صلبة محسوسة وتتفاعل فيما بينها وتنتج الأنواع المتعددة من المواد، مواد حية أو غير حية، التى نراها حولنا. والشىء الثانى: هو الضوء وهو عبارة عن موجات مماثلة للأمواج التى نشاهدها على سطح المياه أو موجات الصوت التى تنتشر فى الهواء. ومع غموض القوى التى نشاهدها مثل الجاذبية (والقوى الكهربية والقوى المغناطيسية)(*). فإنه بوجه عام كان هناك فاصل بين الأجسام المادية وبين الموجات، وقد كان ذلك الانفصال واضحًا لدرجة أن علماء الفيزياء النظرية كان لديهم اعتقاد راسخ بأن فهمنا للعالم حولنا يكاد يكون كاملاً، وأنهم وضعوا النقاط فوق الحروف وأن جميع الحلول لألغاز الطبيعة قد تكون فى متناول اليد.

لم يكد الفيزيائيون يستريحون إلى هذا التفسير للعالم الذى استنزف تسعة عشر قرنًا من الزمان حتى ظهر لهم مع بداية القرن العشرين أن ما تم الحصول عليه هو منزل من أوراق اللعب على وشك الانهيار. فقد أظهر الضوء أنه يمكنه التصرف أحيانًا كجسيمات أطلق عليها فوتونات فى ظروف معينة، وإن كان يتصرف كموجات أيضًا فى ظروف أخرى. وحتى تزداد حيرة الفيزيائيين فإن الجسيمات الصلبة قد تتصرف أحيانًا أيضًا كالموجات كما تزامن ذلك مع الأفكار الجديدة التى أدخلها ألبرت أينشتاين

(*) إضافة من المترجم.

عن الفضاء المكانى والزمانى ومجالات الجاذبية فى نظريته فى النسبية التى قلبت الأفكار الراسخة رأسا على عقب . بدأت هذه الزوابع والأعاصير فى الهدوء مع العشرينيات من القرن العشرين؛ حيث أدرك الفيزيائيون أنهم بصدد صورة جديدة للعالم مختلفة تمامًا عن الصورة السابقة، وما زالت هذه المبادئ الجديدة هى السائدة إلى الآن. إن هذه المبادئ تقول لنا إنه لا توجد جسيمات فقط أو موجات فقط، لكن الأشياء يمكن وصفها على أنها مزيج من المادة الصلبة الجسيمية والأمواج (جسيم - موجات) (Wavicles). كما تقول لنا المبادئ الجديدة إنه لا يمكن التنبؤ بتأكد مطلق من نتيجة أى تجربة على مستوى الذرات أو أقل (كما يمتد ذلك إلى الكون كله) وعلى ذلك فإن العالم تحكمه بشكل عام نظرية الاحتمالات فلا شىء مؤكد تأكيدًا مطلقًا. كما أنها تخبرنا أنه لا يمكن الجمع بين المعرفة التامة لمكان أى شىء وسرعته (أين يتجه)، لكن دقة معرفة أحدهما تكون على حساب الآخر.

وقد سبق لى (المؤلف) شرح لماذا وكيف توصل العلماء إلى هذه الرؤية فى كتاب سابق "فى البحث عن قطة شرودنجر". أما هنا فسوف نكتفى بعرض الصورة العامة لهذه الأفكار دون التعمق فى السياق التاريخى أو التجارب التى زعزعت الاعتقاد الراسخ القديم. لكن دعنا نؤكد أن مبادئ الفيزياء الكمية هذه أصبحت راسخة ومؤكدة الآن(*) ومؤكدة بالتجارب والملاحظات العلمية الدقيقة. ونظرية الفيزياء الكمية ومعها نظرية النسبية العامة هما عماد الفيزياء الحديثة ويقدمان أفضل فهم ممكن حاليًا للكون وكل مكوناته ويحاول العلماء جاهدين دمج هاتين النظريتين فى نظرية واحدة تسمى نظرية المجال الموحد(**).

(*) حينما نتحدث عن نظرية جديدة فإنها لا تلغى النظرية السابقة إطلاقًا؛ حيث إن البناء المنطقى للنظريات العلمية واعتمادها على التجارب العلمية يجعل النظريات القديمة بمثابة حالة خاصة من النظرية الحديثة، أو بمعنى آخر فإن النظرية الحديثة أكثر شمولاً وأوسع آفاقًا وتشمل النظرية القديمة فى حالاتها الخاصة؛ حيث إن التقدم العلمى أشبه بمن يتسلق الجبل فكلما تسلق قمة أعلى شاهد منظرًا أكثر اتساعًا عن ذى قبل.

(**) تنطبق نظرية الفيزياء الكمية على عالم الجسيمات الدقيقة مثل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وتركيب الذرة على سبيل المثال، بينما تفسر نظرية النسبية حركة الأجسام فى الزمان والمكان.

الفوتونات

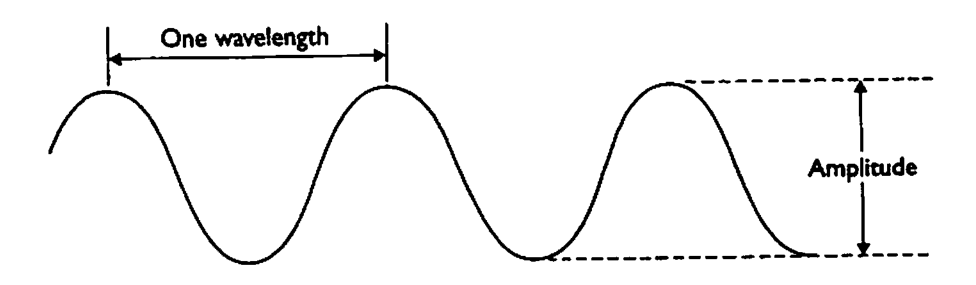
إن أفضل بداية لقصة الفيزياء الكمية والمجال الموحد تكون مع جيمس كلارك ماكسويل ذلك العالم الإسكتلندى والمولود فى أدنبرة عام ١٨٣١ والذى أسهم إسهامات كبيرة فى تقدم الفيزياء، لكن أعظمها على الإطلاق هو نظرية الكهرومغناطيسية (هى النظرية التى قامت على أكتافها كل علوم الراديو والميكروويف التى نعيش فى ظل تقنياتها الآن). مثل الكثير من الفيزيائيين السابقين له، انبهر ماكسويل بظاهرة المجال المغناطيسى المتولد من مرور التيار الكهربى فى سلك، وأن هذا المجال يشبه تمامًا المجال المغناطيسى حول أى قضيب مغناطيسى. هذا المجال المغناطيسى المتولد من التيار الكهربى له القدرة على إحداث انحراف فى البوصلة المغناطيسية إذا ما قرُبت منه. وفى ذات الوقت تبين أن حركة أى مغناطيس بالقرب من سلك تولد فيه تيارًا كهربيًا. وعلى ذلك فقد لاحظ ماكسويل كما لاحظ آخرون أن حركة الشحنات الكهربية (التيار الكهربى) تولد مجالاً مغناطيسيًا كما أن حركة المغناطيس تولد مجالا كهربيًا يؤدى إلى تحريك الشحنات ومرور تيار كهربى. وبذلك فإن القوى الكهربية والقوى المغناطيسية التى ظننا ردحًا طويلاً من الزمن أنهما شيئان ذوا طبيعتين مختلفتين تمامًا قد تبين أنهما وجهان مختلفان لمجال واحد أشمل هو المجال الكهرومغناطيسى.

وقد عكف ماكسويل على محاولة صياغة المعادلات التى تربط المجالات الكهربية والمغناطيسية التى تحكم الظواهر التى لاحظها العلماء وتمكنوا من قياسها. ونتج عن هذا العمل أربع معادلات مشهورة؛ الأولى تمكننا من حساب المجال المغناطيسى الناتج من مرور التيار، والثانية تمكننا من حساب المجال الكهربى الناتج من تغيير المجال المغناطيسى، والثالثة تصف المجال الكهربى الناتج من شحنات كهربية، والرابعة تصف المجال المغناطيسى. والظاهرة الغريبة فى المغناطيسية هى عدم وجود أقطاب مغناطيسية منفصلة، لكنها دائمًا مزدوجة (شمالى وجنوبى). وعندما أتم ماكسويل هذه المعادلات وجد أنها من الناحية الرياضية غير مكتملة، وأسفرت جهوده عن إضافة مقدار فى المعادلة الأولى يمكن بواسطته الحصول على مجال مغناطيسى من تغيير المجال الكهربى حتى فى عدم وجود تيار كهربى، وبذلك اكتملت معادلات ماكسويل الشهيرة.

لم يلاحظ أحد عمليًا هذه الظاهرة حتى ذلك الوقت. لكن ما إن أعاد ماكسويل صياغة المعادلات بطريقة رياضية بديعة ، اتضح جليا السبب فى هذه الإضافة. المكثفات الكهربية تتألف من لوحين معدنيين يفصل بينهما الهواء أو عازل كهربى، وبتوصيل لوحى المكثف ببطارية أو مصدر للتيار الكهربى الثابت، فإن اللوح المتصل بالطرف الموجب للمصدر سوف يختزن كمية من الشحنات الموجبة، كذلك اللوح المتصل بالطرف السالب سوف يختزن كمية مماثلة من الشحنات، لكنها سالبة وبذلك يتولد بين اللوحين مجال كهربى. وقد أوحى ذلك لماكسويل بطريقة حتى يختبر نظريته. ذلك بأن وضع بوصلة داخل الفراغ بين اللوحين، وسرعان ما وجد أنه أثناء توصيل المكثف بالمصدر فإن الشحنات الكهربية على اللوحين تزداد، وبالتالى فإن المجال الكهربى بين اللوحين يكون مجالاً متزايداً (أى متغيراً فى اتجاه الزيادة)، وطبقًا لمعادلات ماكسويل فإنه على الرغم من عدم وجود تيار كهربى بين اللوحين، فإن هناك مجالا كهربيًا متغيراً وبالتالى سوف يتولد مجال مغناطيسى يؤدى لانحراف إبرة البوصلة، وهو ما حدث بالفعل وأثبت أن معادلات ماكسويل صحيحة. وهكذا فإن النظريات العلمية السليمة يمكن أن تؤدى إلى تنبؤات تصدق بالفعل فى الواقع العملى التجريبى.

والآن جاء الاكتشاف الأعظم. تبين لماكسويل أن المجالات الكهرومغناطيسية تبدأ بوجود تيار كهربى متغير ينتج عنه مجال مغناطيسى متغير، وهذا بدوره يولد مجالاً كهربيًا متغيراً، وهذا الأخير يقوم من جديد بتوليد مجال مغناطيسى متغير هذه المرة بدون الحاجة للتيار الكهربى؛ أى أن المجالين الكهربى والمغناطيسى سوف يولد كل منهما الآخر وهكذا دواليك. وقد استطاع ماكسويل من خلال معادلاته أن يبين أن هذين المجالين أو بعبارة أخرى المجال الكهرومغناطيسى سوف ينتشر فى الفراغ إذا ما حصل على الدفعة الأولى فى البداية. هذا المجال الكهرومغناطيسى الدائم التغير سوف ينتشر على هيئة موجات سرعتها كما تنبأت بها المعادلات تساوى ٣٠٠٠٠٠كم/ ثانية. هذه هى تمامًا سرعة الضوء، أى أن نظرية ماكسويل تنبأت مرة ثانية بأن المجال الكهرومغناطيسى سوف ينتشر بسرعة تساوى سرعة الضوء وهى سرعة كان قد سبق قياسها.

لم يمض وقت طويل حتى تبين لماكسويل أن أشعة الضوء ما هى إلا موجات كهرومغناطيسية.



شكل (١-١) يتم تعريف الموجة بالطول الموجى والسعة

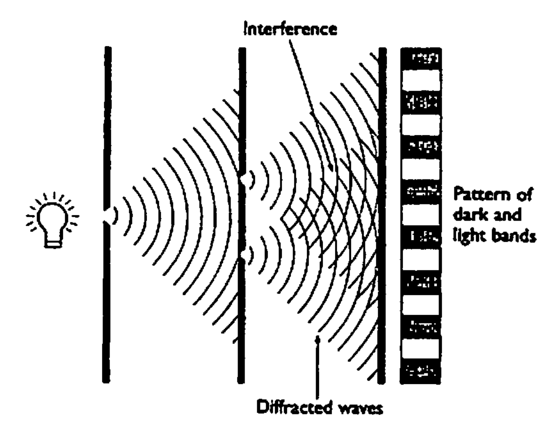
كان هناك العديد من الأدلة الراسخة التى تؤكد أن الضوء له صفة الموجات، وهكذا فإن نظرية ماكسويل وجدت مكانًا مناسبًا تمامًا فى السياق العلمى للقرن التاسع عشر، و لقيت ترحيبًا شديدًا بين الفيزيائيين حيث وجدت لها مكانًا متميزًا. إن أوضح مثال على أن الضوء له خاصية الأمواج هى ظاهرة التداخل الضوئى مثلما يحدث حينما تتولد على سطح الماء موجتان فى مكانين مختلفين ثم تتداخلان فى شكل بديع يسمى نموذج التداخل. كذلك فى حالة الضوء فإن نموذج التداخل يحتوى على مناطق مضيئة ومناطق مظلمة ومناطق ظل. ولا يمكن تفسير هذه الظاهرة بطريقة أخرى.

ظاهرة التداخل الضوئى معروفة منذ القرن الثامن عشر حينما قام الباحث الإنجليزى توماس يونج المولود فى سومرست عام ١٧٧٣ بإجراء مجموعة من التجارب المتميزة؛ حيث استخدم شعاعًا ضوئيًا ذا لون واحد وجعله يمر من خلال فتحتين مستطيلتين رفيعتين جدًا(*)؛ حيث ينقسم الشعاع إلى شعاعين يمران من خلال الفتحتين

(*) تجربة الشق المزدوج.

ويتداخل كل منهما مع الآخر، وتظهر النتيجة على شاشة توضع بعد الفتحتين حيث تشاهد عدداً كبيراً من المناطق المضيئة والمناطق المظلمة، وهو نموذج التداخل التقليدى. وقد سحب هذا الاكتشاف البساط من تحت نظرية نيوتن التى كانت تقول بأن الضوء عبارة عن جسيمات دقيقة.

قدمت معادلات ماكسويل وتجارب يونج ما كان يبدو أنه الفهم الدقيق لماهية الضوء. فهما أساسا النظرية الموجية للضوء، وقد أمكن قياس طول موجات الضوء من خلال دراسة نماذج التداخل الضوئى، وهى المسافة بين قمتين متتاليتين فى الموجة وقد تبين أنها فى حدود ١٠^-٧ من المتر، وأن الألوان المختلفة لها أطوال أمواج مختلفة فاللون الأحمر له طول موجى أكبر عدة أضعاف من اللون الأزرق. كما أن ماكسويل قد أوضح أنه لابد من وجود موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية تشغل حيزا أكبر بكثير من حيز (طيف) الضوء المرئى، بعضها أطول بكثير، وبعضها أقصر بكثير من أطوال موجات الضوء المرئى. وقد تبين صدق هذا، فإن موجات الراديو ذات الطول الموجى الذى يبلغ عدة أمتار قد أمكن توليدها بواسطة الفيزيائى الألمانى هينريش هيرتز قبل نهاية القرن التاسع عشر مثبتًا بذلك صدق ودقة نظريات ماكسويل.



شكل (١-٢) عندما تلتقى موجتان تتداخلان الواحدة مع الأخرى. ويتضح هذا عند إمرار ضوء أحادى اللون من خلال ثقبين دقيقين جدا. تتداخل مجموعتا الأمواج الصادرة من الثقبين وتنتج شكلا مميزا من المناطق المضيئة والمظلمة على الشاشة.

ونحن الآن نعرف الطيف الكامل للأمواج الكهرومغناطيسية بدءًا من موجات الراديو ثم موجات الميكروويف ثم الضوء فالأشعة السينية، كلها تتبع معادلات ماكسويل رغم اختلاف استخداماتها وتأثيراتها. وهذه المعادلات التى تبين كيفية انتقال الموجات الكهرومغناطيسية هى الأساس فى تصميم العديد من الأجهزة مثل التليفزيون والراديو والرادار وغيرها. كما أنها هى الأساس فى تفسير العديد من الظواهر الضوئية مثل الانحراف نحو اللون الأحمر (red shift). هكذا أصبحت النظرية الموجية للضوء راسخة. لكن مع بدايات القرن العشرين بدأ يتضح أن إسحاق نيوتن كان على صواب. فالضوء والموجات الكهرومغناطيسية يمكن فهمهما على أنهما جسيمات لا وزن لها تسمى فوتونات، وفى بعض التجارب العلمية يظهر الضوء بوصفه فوتونات مثلما أوضح ألبرت أينشتاين عام ١٩٠٥.

بدأت الإرهاصات الأولى للنظرية الجسيمية للضوء عام ١٩٠٠ عندما وجد ماكس بلانك العالم الألمانى المولود فى كيل عام ١٨٥٨ – أنه من الضرورى افتراض أن الضوء يتم إشعاعه على هيئة كميات منفصلة من الطاقة، وذلك للوصول إلى المعادلات التى تحكم الإشعاع الضوئى و الموجات الكهرومغناطيسية الأخرى من الأجسام الساخنة. كانت هذه الظاهرة محيرة للعلماء فى التسعينيات من القرن التاسع عشر. حيث قاموا بافتراض أن الموجات الكهرومغناطيسية يتم إشعاعها من المواد نتيجة ذبذبة الجسيمات المشحونة فى الذرة مثل الإلكترونات والأنوية ذاتها. وطبقًا لمعادلات ماكسويل، فإن حركة الشحنات الكهربية سوف تنتج الموجات الكهرومغناطيسية، وبعد ذلك تنتشر هذه الموجات خارج الأجسام الساخنة وتنطلق فى الفضاء. كل هذا مطابق لمعادلات ماكسويل. وقد وجد الفيزيائيون أن نوع الإشعاع (اللون الغالب) يعتمد على درجة الحرارة، نحن نعرف هذا من ملاحظاتنا اليومية فبتسخين قضيب من الحديد فإنه مع ارتفاع درجة الحرارة يبدأ فى الاحمرار نتيجة إشعاع يغلب عليه اللون الأحمر، ولكن مع زيادة درجة الحرارة يتحول اللون تدريجيًا إلى الأبيض حيث يتم إشعاع جميع الألوان، حتى الحديد الساخن فى درجة أقل من الاحمرار فإنه يشع موجات كهرومغناطيسية أيضًا على حيز كبير من الأطوال الموجية، وعلى ذلك فإن الطول الموجى الذى يحوى أكبر كمية

من الطاقة المشعة (قمة منحنى الإشعاع) يبدأ بالطول الموجى الأطول ويتجه إلى الموجات الأقصر كلما زادت درجة الحرارة. إن طبيعة الإشعاع فى جميع الحالات واحدة، لكن ذروة الإشعاع تبين بدقة درجة الحرارة. ويتضح ذلك من خلال شكل الإشعاع الحرارى للجسم الأسود (أى الجسم التام الإشعاع). لكن قبل بحوث ماكس بلانك لم يستطع أحد معالجة معادلات المجالات الكهرومغناطيسية للوصول إلى المعادلات التى تصف طيف إشعاع الجسم الأسود.

وجد بلانك أن الطريقة الوحيدة للوصول إلى معادلات رياضية تصف إشعاع الجسم الأسود هى بافتراض أن الضوء (ونقصد هنا إشعاع الموجات الكهرومغناطيسية عموما) يتم بأن تطلق الجسيمات المشحونة المتذبذبة داخل الذرة الأشعة فى صورة نبضات إشعاعية، كل منها تمثل حزمة يسيرة من الطاقة ومقدار هذه الحزمة ثابت لكل الأشعة ذات الطول الموجى الواحد[١]. و يستتبع هذا بالتالى أن المواد لا يمكنها امتصاص الضوء إلا من خلال هذه الكمات (جمع كمة وتعنى حزمة الطاقة) المحددة من الطاقة. وقد عبر بلانك عن ذلك بافتراض أن تردد الموجات وقد ميزه بالرمز (ت) (الحرف اللاتينى ٧) مضروبا فى مقدار ثابت يساوى هذه الكمات من الطاقة. والتردد هو عدد المرات التى تمر فيها قمة الموجات فى ذات النقطة فى الثانية الواحدة، وفى حالة الطول الموجى $١٠^{-٧}$ من المتر وسرعة الضوء ٣٠٠,٠٠٠كم فى الثانية فإن التردد يصبح ٣ × ١٥١٠ قمة فى الثانية الواحدة أو ما نطلق عليه ٣ × $١٠^{١٥}$ هيرتز نسبة إلى العالم الكبير هينريش هيرتز. وجد بلانك أن الطيف المنبعث من الجسم الأسود[*] يمكن تفسيره نظريا إذا افترضنا أنه لكل تردد من ترددات الضوء (الموجات الكهرومغناطيسية عمومًا) توجد كمية محددة من الطاقة، وقد افترض أن هذه الكمية من الطاقة تساوى التردد (ت) مضروبًا فى مقدار ثابت (هـ) (h) سمى فيما بعد بثابت بلانك. هذه (ط = هـ ت)

(١) اكتشف الإلكترون عام ١٨٩٧ لهذا كان تفسير بلانك غامضا فيما يخص الجسيمات المشحونة داخل الذرة وكيفية تذبذبها لتنتج الموجات الكهرومغناطيسية.

(*) الجسم الذى يمتص جميع الألوان بنفس القدر ويقوم بالإشعاع الكامل فى جميع الأطوال الموجية.

هى أقل قيمة من الطاقة لهذا التردد يمكن للذرة أن تشعها أو تمتصها، ولا يمكن تجزئتها أو إشعاع كسور منها. وبالتالى فالمادة يمكنها إشعاع أو امتصاص أعداد صحيحة (١، ٢، ٣، ...) من هذا المقدار الأساسى من الطاقة لكل تردد.

لم يفترض بلانك أن طاقة الضوء توجد على شكل حزم محددة من الطاقة مقدارها (ط = هـ ت). لقد اعتقد بلانك أن هذا القيد على عملية الإشعاع والامتصاص إنما يتعلق بطبيعة الجسيمات المشحونة التى تتذبذب داخل المادة وتزداد ذبذبتها مع زيادة درجات الحرارة. وقد تمكن من حساب قيمة الثابت (هـ) (h) الذى يسمى الآن ثابت بلانك وقيمته ضئيلة جدًا قدرها $١٠^{-٣٤}$ × ٦,٦ جول ثانية(*). وحتى مع موجات الضوء ذات التردد العالى (نسبيًا بالمقارنة مع موجات الراديو) حيث يبلغ ترددتها $١٠^{١٥}$ هيرتز، فإن طاقة الفوتون الضوئى ضئيلة جدًا وتبلغ حوالى $١٠^{-١٨}$ جول. وإذا أخذنا لمبة كهربية (١٠٠ وات) تعمل لمدة دقيقة فإنها تنتج ٦٠٠٠ جول(**)، ولهذا السبب تبدو لنا اللمبة كما لو كانت تشع الضوء بطريقة ناعمة ومتصلة، ولكن فى الحقيقة فإن الضوء المرئى يتكون من بلايين البلايين من الحزم الضئيلة من الطاقة.

قوبلت نظرية بلانك بالارتباك من علماء الفيزياء، فهى من جهة النظرية الوحيدة التى تقدم تفسير تجارب الإشعاع من الجسم الأسود (الإشعاع التام)، ولكن الأساس الذى بنيت عليه أساس رياضى بحت أو بتعبير آخر حيلة رياضية. كان أينشتاين فى ذلك الوقت مجرد موظف مغمور فى إدارة براءات الاختراع السويسرية، وعلى الفور استطاع أينشتاين أن يضفى على هذه الحيلة الرياضية مظهرًا فيزيائيًا أنيقًا مرتبطًا بالواقع. فقد أوضح أينشتاين أن ظاهرة فيزيائية أخرى محيرة يمكن حلها ببساطة بافتراض أن هذه الحزم من الطاقة هى حقيقة أكيدة، وأن الضوء يوجد فقط على هيئة أجزاء طاقتها (ط = هـ ت). وكانت معالجة أينشتاين، للغز الضوء وماهيته مقنعة جدًا، وأصبحت هى التفسير المنطقى للضوء حتى الآن.

(*) $١٠^{-٣٤}$ تعنى جزءًا من عشرة من بليون من مليار من مليار جزء.

(**) أى ما يقرب من $١٠^{٢٩}$ حزمة طاقة يتم إشعاعها فى الدقيقة الواحدة.

ظاهرة التأثير الكهروضوئى تحدث عندما يسقط شعاع من الضوء على سطح معدنى فى الفراغ. يمكننا أن نلاحظ أن سقوط الضوء يجعل الإلكترونات تقفز من السطح، ويمكننا معرفة عدد الإلكترونات المنبعثة، كذلك الطاقة (السرعة) التى تخرج بها من السطح. اكتشفت هذه الظاهرة عام ١٨٩٩ بواسطة العالم المجرى فيليب لينارد. وكان من السهل قبول فكرة أن الطاقة الضوئية الساقطة تغذى الإلكترونات بطاقة تجعلها تقفز خارجة من سطح المعدن، لكن المفاجأة كانت فى العلاقة بين الطاقة الضوئية وطاقة الإلكترونات الخارجة. استخدم لينارد ضوءًا أحادى اللون أى أن كل الموجات لها ذات التردد. من الظاهر أن الضوء الساطع والقوى يحمل كمية من الطاقة أكبر من الضوء الخافت الضعيف. وعلى هذا فقد تتوقع أنه مع زيادة شدة الضوء الساقط فإن طاقة الإلكترونات القافزة من سطح المعدن تزداد هى أيضًا! شيئًا من هذا لم يحدث، فقد وجد لينارد مع العجب الشديد أنه إذا ما احتفظنا بتردد الضوء ثابتا فإن طاقة الإلكترونات الخارجة من السطح تظل ثابتة مهما غيرنا فى شدة الضوء. وفى هذه الحالة فإن كل إلكترون يخرج من السطح له نفس الطاقة دائما.

حينما قرب لينارد مصباح الضوء قريبًا من السطح المعدنى فإن شدة الضوء الساقط على السطح تزداد، وفى الحقيقة فإن عدد الإلكترونات الخارجة من السطح بالتأثير الكهروضوئى يزداد بطريقة مكافئة للزيادة فى الطاقة. بينما تظل طاقة كل إلكترون مساوية لطاقته عندما كان الضوء خافتًا، على أنه فى تلك الحالة كان عدد الإلكترونات أقل. ومن ناحية أخرى فعندما استخدم ضوءًا ذا تردد أعلى (أى طول موجى أقصر) هنا فقط وجد أن الإلكترونات القافزة لا يزداد عددها، لكن تزداد طاقة كل منها حتى مع تقليل شدة الإضاءة فإن عدد الإلكترونات يقل، لكن تظل طاقتها كما هى، لكنها أعلى من طاقة الإلكترونات المنتجة بواسطة ضوء تردده أقل. والسبب فى هذا بسيط كما يبدو لنا الآن، لكن نظرية أينشتاين (ذلك الموظف المغمور وقتئذ) كانت تعد انقلابًا فكريًا فى ذلك الوقت. افترض أينشتاين (كما قدم الحسابات الداعمة لافتراضاته) أن الشعاع الضوئى ذا التردد (ت) يتكون من سيل من الجسيمات، التى نطلق عليها الآن الفوتونات، كل منها له طاقة تساوى (ط = هـ ت). وعندما يسقط الشعاع الضوئى على

سطح المعدن فإن إلكترونًا سوف يخرج عندما يصطدم فوتون بالذرة بالطريقة الصحيحة. وبذلك يكتسب الإلكترون الخارج طاقة الفوتون ويستهلك جزءًا منها أثناء عملية خروجه من نطاق سطح المعدن حتى يصبح إلكترونا حرًا فى الفضاء. عندما تزداد شدة الضوء فإن عدد الفوتونات يزيد، ولكن طاقة الفوتون تظل ثابتة طالما ظل التردد ثابتًا. بذلك فإن زيادة شدة الضوء ينتج عنها زيادة عدد الإلكترونات القافزة خارجًا من المعدن وليس طاقتها حيث تظل ثابتة. الطريقة الوحيدة لزيادة طاقة كل فوتوإلكترون هى زيادة طاقة الفوتون، والطريقة الوحيدة لذلك هى زيادة تردد الضوء.

لم يلاق هذا الفرض ترحيبًا من علماء الفيزياء فى وقته. فقد ثبت فى أذهانهم أن الضوء عبارة عن موجات، وأثبت ذلك ماكسويل كما أن تجارب يونج فى التداخل الضوئى أثبتت ذلك بما لا يدع مجالاً لأى شك. فكيف يجرؤ ذلك المغمور (أينشتاين) أن يزعزع هذه النظرية الثابتة ويعود إلى مقولة إسحاق نيوتن القديمة إن الضوء مكون من جسيمات. وقد بلغ ذلك مداه لدرجة أن الفيزيائى الأمريكى روبرت مليكان قد ظل يعمل لمدة عشر سنوات لإثبات خطأ فرضية أينشتاين. وفى نهاية تجاربه ولدهشة الجميع فقد أثبت صحة فرضية أينشتاين كما استطاع الحصول على قيم لثابت بلانك h أكثر دقة عن ذى قبل. وقد حصل بلانك على جائزة نوبل فى الفيزياء عام ١٩١٨ ونالها بعد ذلك أينشتاين عام ١٩٢١ ثم نالها مليكان عام ١٩٢٣ . ولا شك فى أنهم جميعًا يستحقون هذه الجائزة لما قدموه من تفسيرات ونظريات، لكن العجيب أن أينشتاين لم يحصل على هذه الجائزة مرة ثانية بعد اكتشافه لنظرية النسبية العامة(٢).

فى خضم هذه التكريمات لهؤلاء الرواد الأوائل لنظرية الكم. فقد ساعدت فرضية بلانك عدداً من علماء الفيزياء الذرية وعلى رأسهم الدانمركى نيلز بوهر على صياغة

---

(٢) أشار بعض الفيزيائيين حديثا أنه توجد طريقة لتفسير ظاهرة التأثير الكهروضوئى بناء على تفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع المادة وذلك بعد معالجة الذرة بفيزياء الكم. وعلى الرغم من مهارة هذا التفسير فإنه لا يسحب البساط من تحت فيزياء الكم، فهو يستخدم فيزياء الكم الحديثة فى وصف الذرة. كما أنه من الصحيح تاريخيًا أن ظاهرة التأثير الكهروضوئى هى التى أقنعت الناس بأن الضوء مكون من فوتونات كما أوضحت جائزة نوبل لأينشتاين وسوف نلتزم بالسياق التاريخى.

أول نموذج مقبول لتركيب الذرة، هو امتداد لأعمال راذرفورد؛ حيث يفترض أن الذرة مكونة من نواة موجبة يدور حولها إلكترونات سالبة أخف منها وزنًا بكثير، وتدور هذه الأخيرة فى مدارات حول النواة تمامًا كما تدور الكواكب حول الشمس. وتقول النظرية التى أسسها بوهر إن مدارات الإلكترونات محددة تمامًا ومنفصلة عن بعضها وتتميز هذه المدارات بكمات محددة من الطاقة، ويسمح للإلكترون بالقفز من مدار إلى آخر ولكن لا يمكنه الوجود بين هذه المدارات. وعندما يقفز الإلكترون من مدار ذى طاقة عالية إلى مدار ذى طاقة منخفضة فإنه يقوم بإشعاع الفرق فى الطاقة على هيئة فوتون طاقته (ط = هـ ت) تساوى الفرق بين طاقتى المدارين. وبالمثل إذا سقط فوتون على إلكترون، فإن الأخير يمكنه امتصاص الفوتون فقط إذا كانت طاقة الفوتون (ط = هـ ت) تساوى تمامًا الفرق بين طاقة الإلكترون وطاقة أحد المدارات الأخرى الأعلى. ولا يمكن للإلكترون أن يمتص جزءًا من طاقة الفوتون، ولا يمكنه الوجود بين المدارات المسموح بها.

ومع أن هذا النموذج للذرة لم يكن كاملاً فى ذلك الوقت، فإنه أعطى العلماء رؤية عن تصرف الإلكترونات داخل الذرة وساعدهم فى نفس الوقت على تفسير الأطياف الذرية التى تشاهد فى المطياف الضوئى على هيئة خطوط مضيئة أو معتمة. فالخطوط المضيئة هى إشعاع ضوئى ذو تردد محدد ولذلك يظهر على هيئة خط مضىء فى المطياف ويحدث عندما ينتقل الإلكترون من مدار عالى الطاقة إلى مدار أقل فى الطاقة؛ أى عندما يهبط سلم الطاقة درجة أو أكثر. أما الخطوط المعتمة فهى فجوات فى الطيف تحدث عند امتصاص الإلكترون لتردد محدد بدقة ويصعد بذلك سلم الطاقة درجة أو أكثر. ومع ذلك فقد كان هناك العديد من الأسئلة دون إجابة فى العشرينيات من القرن العشرين. فمثلاً لا توجد نظرية واحدة للموجات الكهرو مغناطسية و لكن نظريتان، أحيانًا الضوء والأشعة السينية يتم وصفهما انطلاقًا من معادلات ماكسويل (أى أمواج)، وأحيانًا أخرى نلجأ إلى نظرية أينشتاين على أنها فوتونات وأحيانًا خليط من الاثنين كما فى نظرية بلانك لإشعاع الجسم الأسود. والسؤال الأكثر إلحاحًا كان حول مدارات الإلكترونات حول الذرة فكيف يتم تحديد هذه المدارات وكيف يختار الإلكترون المدار

الذى يستقر فيه من بين هذه المدارات، وكيف يتم تحديد عدد هذه المدارات والفواصل بينها. وقد جاءت إجابات هذه الأسئلة ليس عن طريق حسم ماهية الضوء والعودة إلى أفكار القرن التاسع عشر التقليدية، ولكن عن طريق ثورة جديدة زعزت عالم الجسيمات نفسه وأدخلت الأمواج إليه. فقد فاجأ لويس دى برولى عام ١٩٢٤ علماء الفيزياء فى أحد المؤتمرات بالسؤال المفزع الآتى" إذا كانت موجات الضوء تتصرف كالجسيمات، فلماذا لا تقوم الإلكترونات بالعمل نفسه وتتصرف كموجات؟؟؟".

الإلكترونات

ولد دى برولى عام ١٨٩٢ وكان الابن الأصغر لأحد النبلاء الفرنسيين، وقد ورث بعد ذلك اسم العائلة من أخيه وأصبح دوق دى برولى. وقد كان أخوه موريس رائدًا فى مجال أطياف الأشعة السينية. وتعلم لويس من أخيه موريس دى برولى نظرية الكم، وأصبح مفتونا بثورة نظرية الكم. وقد طور لويس دى برولى نظرية بسيطة فى بحثه لنيل درجة الدكتوراه من جامعة السوربون عام ١٩٢٤. وهى نظرية فى غاية البساطة والذكاء، لكنها تطلبت منه تحليلات رياضية دقيقة وصعبة. وسوف نوضح هنا الخطوط العريضة لهذه النظرية الفيزيائية للويس دى برولى فى ماهية المادة، أما إذا كنت تبحث عن البرهان الرياضى فيمكنك الاستعانة بالمراجع.

كان أينشتاين قد صاغ معادلته الرياضية الشهيرة للجسيمات المادية الطاقة = الكتلة فى مربع سرعة الضوء (ط = ك ع٢). كما صاغ بلانك بالتعاون مع أينشتاين نظريته للفوتونات الطاقة = ثابت بلانك فى التردد(ط = هـ ت)، ومع أن الفوتون ليس له كتلة فإن له كمية حركة (momentum)، حيث إنه يصطدم بالإلكترون ويدفعه خارج سطح المعدن. تعرف كمية الحركة للجسيمات المادية بأنها تساوى الكتلة مضروبة فى السرعة. ويمكننا تخيل ذلك كالآتى، فإن جسمًا خفيفًا يسير بسرعة كبيرة يمكن أن يحدث صدمة كبيرة مماثلة لجسم ذى كتلة كبيرة وسرعة بطيئة. تخيل أيضًا الصدمة الناتجة من طلقة مسدس مقارنة بصدمة من كرة ملعب. وبطبيعة الحال فإن الصدمة

الناشئة من جسم ثقيل ويتحرك بسرعة عالية تكون أكبر منهما بكثير. وسرعة الفوتون هى سرعة الضوء (ع) ومن معادلة أينشتاين ط = ك ع٢ (الطاقة = الكتلة فى مربع سرعة الضوء)، فإذا ما استبدلنا ك × ع بكمية الحركة ولنسميها ح فإن معادلة أينشتاين تصبح ط = ح ع. هذه المعادلة تنطبق على الجسيمات المادية كما تنطبق أيضاً على الفوتون.

وقام دى برولى بوضع هذه المعادلة بجوار معادلة بلانك الطاقة = ثابت بلانك فى التردد (ط = هـ ت) وبالتالى حصل على معادلة لكمية الحركة هى (ح = هـ ت ÷ ع)، لكن سرعة الضوء مقسومة على التردد يساوى طول الموجة (ل) λ إذن (ح = هـ ÷ ل) وتفسير ذلك أن الفوتون، وإن كان ليس له كتلة فإن له طاقة تساوى ثابت بلانك فى التردد، وله كمية حركة تساوى ثابت بلانك مقسومة على طول الموجة، وهكذا يتم ربط الخصائص المادية للفوتون وهى الطاقة وكمية الحركة بالخصائص الموجية التردد وطول الموجة. كل ذلك بالاستعانة بثابت بلانك. وتساءل دى برولى لماذا نقف عند هذا الحد؟. فإذا أخذنا الإلكترون وهو جسيم مادى له طاقة حركة، وله كمية حركة إذن بقسمة ثابت بلانك على كمية الحركة نحصل على طول موجى للإلكترون مما يعطى للإلكترون خصائص موجية. بالنسبة للأجسام التى نلاحظها فى الحياة اليومية، فإن الكتلة والسرعة وبالتالى كمية الحركة كبيرة جداً بالمقارنة بثابت بلانك الضئيل (كما ذكرنا آنفا)، وهذا يعنى أن خارج قسمة ثابت بلانك على كمية الحركة فى هذه الحالة يقترب جداً من الصفر وبذلك لا نلاحظ أى خصائص موجية للأجسام التى نلاحظها فى حياتنا اليومية. بالنسبة للإلكترون فإن كتلته ضئيلة جداً وهى حوالى ٩ × ١٠^-٢٨ جرام، ولهذا فإن طول الموجة الناتج لا يمكن إهماله ولا يمكن إهمال الخصائص الموجية للإلكترون.

قال دى برولى لممتحنيه إن هذه النظرية الغريبة سوف يمكن التأكد من صحتها عن طريق قياس أطوال موجات الإلكترونات. لم يأخذ ممتحنوه هذه النظرية على محمل الجد، وإنما اعتبروها إحدى الحيل الرياضية التى ليس لها وجود فيزيائى أو عملى ومع ذلك فقد أرسل بول لانجفين المشرف على رسالة دى برولى نسخة منها إلى أينشتاين. وعلى الفور لمح أينشتاين أهمية هذه النظرية ونتائجها المذهلة وأرسل أينشتاين إلى

لانجفين مؤكداً على أهمية هذا العمل. وبالتالى منح دى برولى درجة الدكتوراه، كما أرسل هذه النتائج إلى عدد كبير من الباحثين، وفى غضون عدة سنوات استطاع فريق من الباحثين فى الولايات المتحدة وبريطانيا[٢] من قياس طول موجة شعاع من الإلكترونات، وذلك عن طريق تشتيتها أثناء مرورها بإحدى البلورات. وهذه التجربة للإلكترونات مماثلة لتجربة التداخل الضوئى من شقين مزدوجين التى أجراها يونج، حيث إن الموجات فقط هى التى تتداخل وتنتج نموذجًا للتداخل، وحيث إن شعاع الإلكترونات المار داخل البلورة قد أحدث نموذجًا للتداخل مشابهًا للتداخل الضوئى، وأمكن من دارسة هذا النموذج قياس طول الموجة، إذن الإلكترونات تتداخل أيضًا مع بعضها فى ظروف معينة. وهكذا قام العالم النمساوى أروين شرودنجر بصياغة معادلة موجية للإلكترونات مشابهة لمعادلات ماكسويل للضوء. وقد أصبحت نظرية شرودنجر إحدى الدعائم الأساسية للنظرية الذرية الحديثة، وقد نال دى برولى جائزة نوبل فى الفيزياء عام ١٩٢٩، ومنذ ذلك الحين أصبح واضحًا أن كل الموجات يمكن التعامل معها كجسيمات وأن كل الجسيمات يمكن التعامل معها كموجات. وهذه الازدواجية ليست واضحة فى حياتنا اليومية؛ حيث الأجسام كبيرة جداً وثقيلة بالمقارنة بثابت بلانك فيمكن إهمال خصائصها الموجية فى هذه الحالة ولكنها أساسية فى فهم الجسيمات الدقيقة وحركتها وتركيب الذرة ومكوناتها. وهكذا فإنه فى حقبة العشرينيات من القرن العشرين شعر العلماء بالسعادة لحصولهم أخيراً على نظرية كاملة للتركيب الذرى، وإن كان ذلك على حساب ضرورة القبول ببعض الأفكار الغريبة حول ازدواجية الجسيمات والأمواج (الازدواجية الجسموجية). وعلى كل فإن غرابة هذه الازدواجية هى أقل الأشياء غرابة من تلك التى فتحها أمامنا عالم الفيزياء الكمية.

---

(٢) أحد الفيزيائين الذين ساهموا فى هذه الأبحاث هو جورج طومسون ابن العالم الكبير ج. ج. طومسون الذى حضر حفل تسليم ابنه جورج طومسون جائزة نوبل عام ١٩٣٧ لإسهاماته فى إثبات أن الإلكترون له خصائص موجية بالتجربة العملية. وبالتأكيد تذكر ج. ج. طومسون عام ١٩٠٦ عندما نال هو نفسه جائزة نوبل لاكتشافاته التى أثبتت وجود الإلكترون كجسيم مادى داخل الذرة. وهكذا فإن الأب قد أثبت الخواص المادية والجسيمية للإلكترون، والابن أثبت الخواص الموجية له ونال كل منهما جائزة نوبل. ولا شىء يلخص الطبيعة الغريبة للحقيقة الكمية أكثر من هذه الثنائية للأب والابن.

(اللغز) المحورى

توجد تجربة معملية تؤكد مبادئ فيزياء الكم وتوضح هذا الغموض فى ماهية المادة والموجات وهذه الازدواجية. إنها النموذج المتطور لتجربة يونج الذى استعمل الشقين المزدوجين ليثبت أن الضوء هو صورة من صور الموجات. يمكن إجراء هذه التجربة باستخدام الضوء أو الإلكترونات أو جسيمات أخرى مثل البروتونات، وهى لا تستخدم شقين متوازيين ولكن ما يناظر عددًا كبيرًا من الشقوق المتوازية، أو ما يطلق عليه الآن المحزوز الطيفى، وهو عبارة عن لوح زجاجى رسم (أو نحت عليه) عدد كبير جداً من الخطوط المستقيمة المتوازية التى تصل إلى ٦٠٠-٣٠٠٠ خط فى المليمتر الواحد. وفى حالة الإلكترون أو الأشعة السينية فإن مصفوفة الذرات داخل البلورة تماثل تمامًا المحزوز الطيفى للضوء. وكلاهما يتسبب فى حدوث ظاهرة التداخل الموجى سواء للضوء (المحزوز) أو للإلكترون والجسيمات الأخرى (البلورة). و بالتالى فسوف نشرح فيما يلى تداخل الإلكترونات من شقين مزدوجين على سبيل التبسيط وتقريب المفهوم الفيزيائى وكل ما سوف نذكره الآن هو من قبيل التجارب العلمية التى أجريت آلاف المرات وتم مراجعتها والتأكد منها ومن نتائجها، وتشمل الإلكترونات و الفوتونات والجسيمات الأخرى. ولا نتحدث عن فروض رياضية تخيلية ولكن كلها نتائج عملية وتعد من الحقائق.

والحالة المبسطة للتجربة تتكون من مصدر للإلكترونات (مدفع للإلكترونات) مثل ذلك الموجود فى أنبوبة الشاشة فى أجهزة التليفزيون المعتادة ويوضع أمامها حائل ذو ثقبين (يجب أن يكون عرض كل ثقب صغيرًا بالنسبة لطول موجة الإلكترون(*) ولهذا فإن الفجوات بين الذرات فى البلورة تفى تمامًا لهذا الغرض)، ثم جهاز كاشف لتتبع

(*) إذا اعتبرنا أن كتلة الإلكترون ٩×١٠^-٢٨ جرام، وتم إكسابه سرعة عالية من خلال فرق جهد كبير قدره ١٠ آلاف فولت، فإن طول موجة الإلكترون لن يزيد عن ١٠ إنجستروم وهى فى حدود المسافة بين الذرات فى البلورة، ولهذا السبب لا يمكن عمل ثقب بهذا العرض، ولكن يستخدم مصفوفات الذرات داخل البلورات لإحداث تداخل الإلكترونات.

الإلكترونات ويمكن أن يكون مجرد شاشة فسفورية تضيء عند سقوط الإلكترون عليها، وبالتالى يمكننا تسجيل أين ومتى سوف يسقط الإلكترون بعد مروره من البلورة على الشاشة، كما أن إضاءة كل نقطة على الشاشة سوف تعتمد على عدد الإلكترونات الساقطة على هذه النقطة. عند مرور الموجات من الثقبين، فإن كل ثقب يصبح مصدراً ثانوياً للموجات التى تنتشر فى شكل كروى بطريقة متوافقة تماماً من كلا الثقبين، وعندما تسقط الموجتان على الشاشة، فإنه يتم جمع الموجتين فإذا صادفت قمة من الموجة الأولى قمة من الموجة الثانية، فإن تأثير الموجتين على الشاشة يكون أقوى، وأما إذا صادفت قمة من الموجة الأولى قاعاً من الموجة الثانية، فإن المحصلة تكون صفرا ولا يكون هناك تأثير ما على الشاشة، وهذا هو السبب فى مشاهدة أجزاء مضيئة وأخرى مظلمة على الشاشة الثانية، وهو ما يسمى بأهداب التداخل.

أما إذا غطينا إحدى هذه الثقوب، فإن كل ما سوف نشاهده هو بقعة مضيئة (أو خط مضىء طبقًا لشكل الثقب)، ويكون مركز هذه البقعة هو الأشد إضاءة وتتلاشى تدريجياً الإضاءة، نفس ما يحدث مع الموجات يحدث بعيداً عن المركز حتى تختفى تماماً.

إذا ما قمنا بتسليط شعاع من الإلكترونات يمر من خلال شاشة ذات ثقب واحد (شق واحد)، فإننا سوف نلاحظ على الشاشة الفسفورية (الثانية) بقعة واحدة تأخذ شكل الثقب وتتلاشى الإضاءة تدريجياً بعيداً عن المركز. وفى تجربتنا ذات الثقبين (الشقين) فيمكننا إثبات ذلك بتغطية أحد الثقبين وملاحظة الشاشة الفسفورية، وذلك متطابق مع حالة الضوء السابق شرحها، حيث سوف نلاحظ وجود بقعة ضوئية على الشاشة الفسفورية متناظرة مع الثقب غير المغطى؛ ولكن عندما يفتح الثقبان لمرور الإلكترونات، فإننا نلاحظ أهداب التداخل (نموذج التداخل) على الشاشة الفسفورية، ويتكون من أجزاء مضيئة تميز النقط التى سقط عليها إلكترون أو أكثر وأجزاء مظلمة تفصل بينها، وهذا يمكن تفسيره من خلال الخواص الموجية للإلكترونات. الموجات الإلكترونية تمر من خلال الثقبين وتتداخل معا متلاشية فى بعض الأجزاء وتقوى بعضها البعض فى بعض الأجزاء الأخرى تماماً مثلما يحدث مع الموجات.

لا توجد مشكلة حتى الآن. إذن من الغريب أن الإلكترونات تتصرف كما لو كانت موجات حينما تمر من الثقبين (أو حتى ثقب واحد)، ثم فى أثناء رحلتها إلى الشاشة الفسفورية تندمج ثانية لتصطدم بالشاشة كجسيمات منتجة نبضات ضوئية نشاهدها ونرى المناطق المضيئة والمناطق المظلمة فى نموذج التداخل الإلكترونى. وهكذا يمكننا أن نقتنع بأن الازدواجية الجسيمية و الموجية للإلكترونات يمكنها تفسير ظاهرة التداخل هذه. وهنا نذكر أنفسنا بأن الموجات على سطح الماء مكونة من عدد كبير من جزيئات الماء التى تتحرك صعوداً وهبوطاً منتجة الشكل الموجى، فإذا سلطنا شعاعًا من الإلكترونات مكون من مئات الآلاف من الإلكترونات على الثقبين، فإنه من المقبول أن نتصور أن هذا العدد الكبير يتم توجيه حركتــه كموجات (مثل موجات سطح الماء) بينما تحتفظ الإلكترونات بماهيتها الجسيمية (مثل جزئيات الماء فى المثال السابق)، أما إذا سلطنا إلكتروناً واحداً فقط فى اللحظة الواحدة على الثقبين، فإننا سوف نعتقد بأنه سوف يمر من خلال أحد الثقبين. وبناء على ذلك المنطق المتطابق مع حياتنا اليومية، فإن نموذج التداخل يحدث فى حالة وجود عدد كبير من الإلكترونات، وليس إلكتروناً واحداً.

إذن ماذا يحدث فى تجربتنا السابقة إذا ما أسقطنا إلكتروناً واحداً فقط على الثقبين؟ فى الواقع لا يمكن مشاهدة أى تأثير على الشاشة عندما يسقط عليها إلكترون واحد، وبالتالى لا يمكن معرفة أى شىء عن تصرف الإلكترون. دعنا نعيد التجربة عدة مرات بإسقاط إلكترون واحد كل مرة حتى تتراكم الإشعاعات المنبعثة من الشاشة الفسفورية بطريقة يمكن ملاحظتها. والآن ماذا نرى؟، إننا سوف نشاهد نفس نموذج التداخل (أهداب التداخل) السابق شرحها تبدأ فى الظهور ضعيفة، ثم تزداد شيئاً فشيئاً. والنتيجة هى أن كل إلكترون على حدة عندما سقط على الثقبين تصرف كموجة وتتداخل مع نفسه محدثاً نموذج تداخل ضعيف جداً على الشاشة الفسفورية، وعندما تراكمت هذه النماذج نتيجة سقوط عدد كبير من الإلكترونات المفردة؛ يبدأ نموذج التداخل فى الظهور تدريجياً. والتفسير البديل الآخر هو أن كل الإلكترونات المارة من خلال الثقبين قد تداخلت مع بعضها برغم مرورها فى أوقات مختلفة؛ أى أن الإلكترونات لها ذاكرة تداخلت من خلالها نتيجة نموذج التداخل.

كيف يمر الإلكترون الواحد من الثقبين؟ إن هذا يبدو من غير المعقول، فيمكننا من الناحية العملية تعقيد التجربة السابقة أكثر بإضافة مجموعتين من الكواشف يمكنها إخبارنا بأى الثقبين مر كل إلكترون، ثم نكرر التجربة لنعرف ماذا حدث. سوف نجد أن هذه الكواشف لا تُظهر أبدًا أن الإلكترون أو نصف الإلكترون قد مر منهما معًا فى وقت واحد، ولكن أحيانًا يمر من أحدهما وأحيانًا أخرى من الثانى. وماذا عن نموذج التداخل؟ بإرسال آلاف الإلكترونات واحد كل مرة على التتابع، فإن شكلا يبدأ فى الظهور على الشاشة الفوسفورية، ولكنه ليس نموذج التداخل وليست أهداب التداخل إنما فقط بقعتين مضيئتين مناظرتين للثقبين، أى كما لو أن الإلكترونات مرت من أحد الثقوب محدثة بقعة، ثم مرت من الآخر محدثة بقعة أخرى بدون تداخل.

إن هذا هو أعجب ما فى الموضوع. الإلكترون مخادع كبير فعندما حاولنا رصده تصرف كما لو كان جسيمًا ليست له خواص موجية. وعندما تركناه بدون رصد تصرف كموجة. عندما حاولنا معرفة من أى الثقوب سوف يمر، تصرف كجسيم ومر من أحد الثقوب ولم يمر من الآخر متجاهلاً، تمامًا، ولم يحدث نموذج التداخل. وعندما لم نحاول تحديد مساره تصرف كموجة وكأنه رأى الثقبين فمر منها معًا محدثًا نموذج التداخل.

استطاع علماء فيزياء الكم صياغة هذه الحقائق بطريقة مذهلة، فهم يقولون إن هناك موجة ما مرتبطة بالإلكترون وتسمى الدالة الموجية، وهى تنتشر وتملأ الفراغ كله. وقد قدم شرودنجر معادلة شهيرة لحساب الدوال الموجية وكيف تتفاعل مع بعضها البعض. النقطة التى تكون فيها الدالة الموجية أقوى ما يمكن تشير إلى مكان وجود الإلكترون بلغتنا البسيطة. وتخفت الدالة الموجية بعيدًا عن هذه النقطة (مكان الإلكترون). وهذه المعادلة تتنبأ بشكل تام بتصرف الإلكترونات فى الظروف المختلفة، فهى تظهر لنا كيف تتداخل الإلكترونات فى حالة مرورها من الثقبين، أما عند محاولتنا رصد الإلكترون ومن أى الثقبين مر فإن هذه الدالة الموجية "تنهار". فى هذه اللحظة، فإن مكان الإلكترون يمكن معرفته فى حدود الدقة التى تسمح بها القواعد الأساسية لفيزياء الكم.

ولكن بمجـــرد أن نكـــف عن رصـــد الإلكـــترون، فـإن الدالـــة الموجـيـة لا تلبـــث أن تنتشـر ثانية وتتـداخل مع الدوال الموجيـة المصـاحبة للإلكترونات الأخرى وأحيانا مع نفسها[٤].

إن التفسير الفيزيائى السابق هو نظرية رياضية متكاملة يمكن من خلالها حساب أوضاع الإلكترونات فى الذرات وأوضاع الذرات فى الجزيئات وأكثر من ذلك أيضًا. أن مصطلح "انهيار الدالة الموجية" (وهو مصطلح رياضى دقيق المعنى فى النظرية الكمية) هو مكافئ لقولنا إننا نستطيع أن نعرف أين توجد الأشياء عندما ننظر إليها فقط. وعندما نطرف بأعيننا، فإنها تذهب ولا تكون موجودة. تصرف الجسيمات الصغيرة يعتمد على ما إذا كنا ننظر إليها أم لا. إذا ما راقبنا الثقبين لنعرف من أيهما يمر الإلكترون، فإنه يتصرف كجسيم، وليس كموجة، وعندما لا نراقب الثقبين، فإنه يتصرف كموجة. وعلى هذا، فإن الملاحظ (الشخص أو الجهاز الذى يراقب) هو جزء من منظومة التجربة ونتيجة التجربة تعتمد على وجوده من عدمه.

إن ما تم التوصل إليه من خلال نظرية الكم هو معقد بشكل كبير، فمن ناحية لا يمكننا الجزم بأن الإلكترون هو جسيم محدد ومتركز فى نقطة، يبدأ التحرك من نقطة فى بداية التجربة ويسير فى مسار محدد ليصل إلى النقطة الأخرى. فكرة المسار المحدد مثل مسار كرة القدم، عندما تركلها لتستقر فى مكان آخر هى إحدى أفكار الميكانيكا الكلاسيكية التى أرساها إسحاق نيوتن. ولكن فى عالم ميكانيكا الكم يجب أن نلغى فكرة المسار تمامًا من اعتبارنا. يتحدث علماء فيزياء الكم عن الحوادث التى تقع

---

(٤) كيف نعرف ماذا تفعل موجة الإلكترون بينما نحن لا ننظر إليها ولا نرصدها؟.
إن هذا هو نتيجة الملاحظات المتكررة والتجارب المتكررة لتحديد مكان الإلكترون والطريق التى تسلكه. إن التفسير الرياضى السليم للدالة الموجية، يختلف قليلاً عن هذا التفسير المبسط جداً. وإذا أردت تفصيلاً أكبر فى هذا الموضوع فيمكنك مراجعة كتاب المؤلف "فى البحث عن قطة شرودنجر".
"In search of Schrodinger's Cat".

فى ترتيب زمنى، ولكننا لا نعرف شيئًا، ولا يمكن أن نعرف ماذا حدث للجسيمات أو أين هى أو كيف تتصرف عندما لا تكون تحت الملاحظة. فكل ما يمكننا قوله هو أننا لاحظنا وجود الإلكترون فى نقطة البدء (الحدث الأول)، ثم لاحظنا وجود الإلكترون فى نقطة النهاية (الحدث الثانى). ولا يمكننا بأى حال معرفة أى شىء عن الإلكترون أو ماذا فعل بين الحدثين الأول والثانى، بل إنه حتى لا يمكننا الجزم بأن الإلكترون الذى لاحظناه فى نقطة البداية هو ذات الإلكترون الذى لاحظناه فى نقطة النهاية. فإذا أطلق إلكترونان من نقطة البداية فإن الإلكترونان يصلان بعد فترة زمنية إلى نقطة النهاية، ولا يمكننا تمييز أى منها عن الآخر.

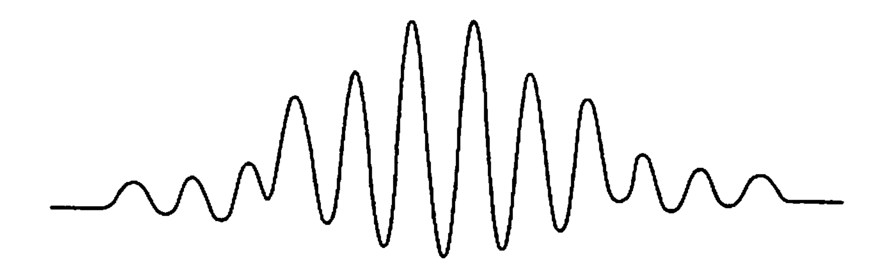
الإلكترونات إذن غير مميزة أحدها عن الآخر تمامًا وبطريقة أكثر عمقًا مما نلاحظه من الأشياء التى نستخدمها فى حياتنا اليومية مثل دبابيس الأوراق أو غيرها. فالإلكترونات فى النواة ليست أشياء مختلفة عن بعضها فيزيائيًا، وكل منها يتحرك فى مسار معلوم ومحدد تمامًا حول النواة. ولكن كل ما نستطيع قوله هو أن هذه الذرة تتصرف كما لو أنها مرتبطة بعدد من الدوال الموجية للإلكترونات ثمانية أو عشرة أو أيا ما كان عددها. إذا ما أجرينا تجربة على الذرة مثل تجربة التأثير الكهروضوئى؛ حيث يسقط فوتون مثلاً على الذرة، فإن هذه الدوال الموجية كلها أو إحداها يحدث بها تغييرات بحيث يكون هناك احتمال كبير لملاحظة إلكترون خارجًا عن الذرة كما لو أنه قذف منها. ولكن الحقيقة هى فقط ما نلاحظه، أما غير ذلك فليس أكثر من نماذج رياضية افتراضية نتصورها فى عقولنا ونحولها إلى معادلات رياضية لمساعدتنا فى فهم ما يحدث.

والآن السؤال ما حقيقة الإلكترونات؟ أهى جسيمات أم موجات؟ إن هذا يعتمد على طبيعة السؤال. مهما بلغت مهارة الفيزيائيين، لا توجد حقيقة مؤكدة بشكل مطلق بشأن الإجابة التى سوف تأتى.

الجسيم هو شيء محدد تمامًا. وموجود في نقطة الفراغ ويحتل حجمًا صغيرًا حول هذه النقطة، ولهذا فإن له حقيقة ملموسة طبقًا لتجربتنا الحياتية اليومية. وعلى النقيض من ذلك تكون الموجة، فالموجة الواحدة (النقية) تمتد في الفراغ ولا نستطيع أن نقول إنها موجودة في نقطة ما. يمكننا أن نحدد لها اتجاهًا محدداً للانتشار، كما أنها تحمل كمية من الطاقة والحركة. ولكن لا يمكنك (ولا حتى تخيلا) أن تحتويها بين يديك وتنظر إليها. إذن كيف تندمج هاتين الخاصيتين المتضادتين في عالم مكونات الذرة.

وفي سبيل فهم كيفية اكتساب الموجة لخاصية الجسيم - كما في حالة الفوتون أو الإلكترون - فإن الموجة يجب أن يتم احتواؤها بطريقة ما، وكما يعلم الرياضيون فإن السبيل لإحتواء الموجة هو أن تفقد نقائها(*). فبدلاً من أن تكون موجة ذات تردد واحد محدد دعنا نعتبر حزمة من الموجات تشغل حيزًا من الترددات وتتحرك معًا. هنا المحصلة لهذه الحزمة عند أي نقطة نحصل عليها من جمع قيمة كل الموجات عند هذه النقط. في بعض النقاط حيث تجتمع جميع القمم (أو القيعان) في الحزمة الموجية فإن قيمة الموجة تصبح كبيرة جداً، وعندما تجتمع قمة مع قاع فإن الناتج يكون موجة ضعيفة أو صفراً. وباستخدام تقنية رياضية تعرف بتحليل فورييه (Fourier Analysis) يمكن للرياضيين وصف مجموعات من الموجات تتلاشى محصلتها تقريبًا في الفراغ كله عدا منطقة واحدة محددة ، و تسمى هذه المجموعات حزمة موجية. وكلما زاد عدد الموجات في الحزمة، كلما صارت الموجة محصورة في منطقة أصغر حجمًا وأكثر تحديداً. وقد اصطلح علماء الرياضيات على استخدام الرمز (Δ) للإشارة إلى الكميات الضئيلة، وعلى هذا يمكن تحديد طول المنطقة المحددة فيها الحزمة الموجية بالقيمة Δ س.

(*) نعلم أن الموجة النقية مكونة من عدد لا نهائي من القمم والقيعان، ويفصل دائمًا بين كل قمتين قاع وتسمى المسافة بين قمتين طول الموجة، كما أن عدد القمم التي تمر بالنقطة الواحدة في الثانية هي تردد الموجة. وكل القمم والقيعان متساوية.



شكل (١-٣) الحزمة الموجية هى مجموعة من الموجات تغطى فقط حيزًا صغيرًا من الفراغ

إذن بدلاً من اعتبار موجة نقية ذات تردد واحد محدد فإنه باستخدام حزمة من الموجات يمكننا حصر هذه الحزمة فى حيز يعادل حجم الإلكترون.

لكن من ناحية أخرى فإننا فقدنا تعريف كمية الحركة للموجة. كما نتذكر فإن دى برولى قد عرف كمية حركة الموجة. (ح = هـ ÷ ل) (ثابت بلانك ÷ طول الموجة).

وحيث إننا نتعامل الآن مع مجموعة من الموجات، فسوف يكون لها مجموعة من كميات الحركة، وليست قيمة واحدة فقط لكمية الحركة. كما أن هناك مجموعة من الترددات. يمكننا ملاحظة أنه كلما زاد عدد الموجات، كلما أمكننا حصر الحزمة فى حيز أصغر، ولكن من ناحية أخرى يزداد عدد القيم التى تمثل كمية الحركة، وبالتالى لا نستطيع تحديد قيمة واضحة لكمية الحركة. إذن يمكننا فقط تحديد نطاق (حيز) لقيم كمية الحركة Δ ح(*) وتمثل Δ ح (Δ P) عدم اليقين فى كمية الحركة. والآن يمكننا القول بأن Δ س تمثل عدم اليقين فى مكان وجود الحزمة الموجية، Δ ح تمثل عدم اليقين فى كمية الحركة للحزمة الموجية فنحن نعلم عمومًا إلى أين تشير الحزمة فى حدود عدم اليقين من كمية الحركة Δ ح.

(*) إذا ما قمنا بحساب أكبر وأصغر قيمة لكميات الحركة للأمواج داخل الحزمة الموجية، فإن Δ ح تمثل الفرق بينها، وهى تمثل النطاق العددى الذى يمثل كميات الحركة فمثلاً إذا كانت أكبر قيمة هى ١٠٠متر/ث، وأصغر قيمة هى ٧٥كجم متر/ثانية، فإن Δ ح = ٢٥ كجم متر/ث، وهى تمثل الحيز الذى توجد فيه جميع القيم الأخرى بكميات حركة الموجات.

ومن الواضح أنه لا يمكن النزول بقيم Δ س Δ ح لتكون صفرًا وقد أمكن إثبات أن حاصل ضربها دائمًا أكبر من ثابت بلانك.

$$\Delta \text{س} . \Delta \text{ح} \geq \frac{\text{هـ}}{\text{٢ط}}$$

وقد جرت عادة الفيزيائين على تسمية هذا الثابت *h* (هـَ)

وهذه العلاقة بين عدم اليقين فى المكان وكمية الحركة تسمى بعلاقة عدم اليقين لهايزنبرج، نسبة إلى العالم الألمانى فيرنر هايزنبرج، والحائز على جائزة نوبل وأحد الرواد الذين أسهموا فى تشييد نظرية الكم فى العشرينيات من القرن العشرين.

يجب التأكيد على أن العلاقة السابقة ليست فقط مجرد تعبير رياضى، ولكن بناء على ظاهرة الازدواج الجسموجى يتم تفسير هذه العلاقة على أنه لا يمكن تحديد مكان الجسيم وكمية حركته (سرعته) بطريقة مطلقة وبدقة كاملة فى آن واحد. إذا أمكنك تحديد مكان الإلكترون بدقة كاملة أى أن Δ س تصبح صفرًا، وفى هذه الحالة فإن Δ ح تصبح ما لانهاية أى أنه لا يمكنك على الإطلاق حساب المكان الذى سوف يذهب إليه الإلكترون(*). والمعنى العميق لعلاقة عدم اليقين أنها لا تنطبق فقط على معلوماتنا عن الإلكترون (أى لا تتعلق بأدواتنا فى القياس)، ولكنها أحد المبادئ الأساسية فى فيزياء الكم. وهى إحدى خواص الجسيمات والأمواج الأساسية. الجسيم نفسه لا يعلم بدقة أين يوجد الآن، أو إلى أين سوف يذهب فى وقت تالٍ. إن مبدأ عدم اليقين مرتبط تمامًا بمبدأ "الصدفة" فى فيزياء الكم. إذن لا يمكننا التحديد المطلق لنقطة وجود الجسيم (إحداثياته) الآن، ولا يمكننا التأكد من المكان الذى سوف يظهر فيه الجسيم بعد ذلك. ولهذا فإن العلماء الباحثين فى مجال الجسيمات الدقيقة لا يفاجئون عندما تظهر هذه الأجسام فى أماكن غير متوقعة.

(*) طبقًا لقواعد الميكانيكا الكلاسيكية التى وضعها نيوتن إذا أمكن فى لحظة ما معرفة مكان وسرعة أى جسم والقوة المؤثرة عليه فإن من الممكن التنبؤ بمكان الجسم فى أى لحظة تالية. ولكن فى حالة الجسيمات الدقيقة (الإلكترون مثلاً)، فإن علاقة عدم اليقين لا تتعارض مع هذه القوانين، ولكنها تخبرنا ببساطة أنه لا توجد أى طريقة يمكن بها تحديد مكان الإلكترون وسرعته بدقة متناهية فى ذات الوقت.

ليس المكان وكمية الحركة الخاصيتين الوحيدتين للجسيم المرتبطتين ببعضهما من خلال علاقة عدم اليقين. ولكن توجد هناك ثنائيات أخرى مرتبطة ببعضها كذلك وتسمى كل ثنائية منها "المتغيرات المترافقة" Conjugated variables، ومن أهم هذه الثنائيات الطاقة (ط) والزمن (ز). فقد أمكن رياضياً إثبات أن هناك عدم يقين أساسى فى معرفة كمية الطاقة فى التفاعلات النووية. فإذا انتقلت الطاقة من جسيم إلى آخر من الجسيمات الدقيقة فى أحد التفاعلات النووية، والتى بالضرورة لا تتم بصورة آنية، ولكنها تستغرق فترة زمنية مهما قصرت (حيث إنه لا شيء يتحرك أسرع من الضوء)، فإن عدم اليقين فى كمية الطاقة Δ ط إذا ما ضرب فى عدم اليقين فى الزمن Δ ز، فإن حاصل الضرب هو ذات الكمية السابقة هـَ.

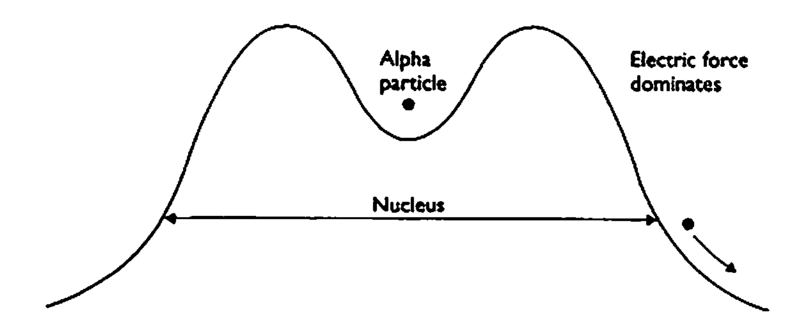
Δ ط . Δ ز > هـَ

أى أنه خلال فترة زمنية قصيرة، فإنه لا الجسيم ولا ما يحيط به – وفى الحقيقة ولا الكون كله – يمكنه تحديد طاقة الجسيم خلالها. وأحد الشواهد على ذلك نجدها فى ظاهرة الانتقال النفقى Tunnel effect حيث تخرج جسيمات ألفا إلى خارج الذرة بطريقة تظهر لنا القدرة الهائلة لمبدأ عدم اليقين فى عالم الذرة. وقد قدم جورج جامو تفسيراً كاملاً لإشعاع جسيمات ألفا باستخدام معادلات فيزياء الكم، ولكن دعنا نستشف ما يجرى بصفة عامة.

إذا تصورنا النواة على هيئة فوهة منخفضة فى الوسط وعالية فى المحيط الدائرى، ثم تنخفض إلى الوادى بعد ذلك (مثل الفوهات التى نشاهدها عادة فى البراكين) وترقد جسيمات ألفا على مركز الفوهة المنخفض. إذا انتقلت جسيمات ألفا عبر المحيط الدائرى المرتفع عن المركز، فإنها سوف تتحرك مسرعة خارج النواة نتيجة التنافر الكهربى(*).

(*) جسيمات ألفا تتكون من ٢ بروتون موجب الشحنة و٢ نيوترون متعادل، والنواة بالطبع موجبة الشحنة.

دعنا نفترض أن المسافة من مركز النواة إلى خارجها Δ س. حيث إن جسيم ألفا داخل النواة له كمية حركة يمكن تحديدها بدقة عالية تمامًا كالنواة؛ حيث إنهما مرتبطان تمامًا مما يعنى أن تحديد مكان الجسيم لا يمكن أن يكون دقيقًا تمامًا طبقًا لمبدأ عدم التأكد. ومع أن طاقة الجسيم أقل من الحاجز الدائرى المحيط للنواة (كما سبق شرح هذا)، وعلى هذا فلا يستطيع الجسيم الانتقال من داخل النواة إلى خارجها عبر هذا الحاجز. ولكن ماذا يعنى داخل النواة أنه ليس المعنى الدارج المتعارف عليه. مبدأ عدم اليقين يظهر لنا أنه يوجد احتمال يمكن حساب قيمته لوجود الجسيم خارج النواة. يا للعجب هكذا تجد بعض الجسيمات نفسها خارج النواة فتبدأ فى الابتعاد عنها(*) وتسمى هذه الظاهرة بالانتقال النفقى حيث يعبر جسيم ألفا الحاجز النووى دون أن يمتلك الطاقة الضرورية لعبور هذا المانع. إن ما حدث يشبه التجربة الآتية،



شكل (١-٤) تفسر فيزياء الكم الكيفية التى يهرب بها جسيم ألفا من النواة بواسطة مبدأ عدم اليقين. حيث يستلف الجسيم كمية من الطاقة من خلال عدم اليقين حتى يستطيع تسلق حاجز النواة، وعندما يخرج إلى الطريق المنحدر يهرب، ويمكنه حينئذ إرجاع الطاقة. ومن جهة أخرى فإن عدم اليقين فى المكان يجعل من الممكن أن يظهر خارج النواة من خلال المعرفة التامة بكمية الحركة داخل النواة كما لو كان قد عبر الحاجز من خلال نفق.

(*) داخل النواة تلعب القوى النووية كما ذكرنا سابقًا الدور الأهم؛ حيث تكون أقوى مئات المرات من قوى التنافر الكهربى، ولكن إذا خرج الجسيم خارج مجال النواة، فإن القوى الفاعلة تكون فقط قوى التنافر الكهربى حيث تتلاشى القوى النووية الرابطة للنواة.

ضع عدداً من زهر الطاولة داخل كوب وابدأ في رج الكوب بشدة، فسوف يحدث أن تجد زهرًا منه انطلق مبتعدًا عن الكوب(*). وإذا كان ثابت بلانك كبيراً إلى حد كافٍ لكان من الممكن مشاهدة هذه الظاهرة في حياتنا اليومية مع الأجسام الكبيرة.

طريقة أخرى للتفسير؛ يحتاج الجسيم إلى كمية من الطاقة إضافية حتى يمكنه عبور حاجز النواة، وخلال فترة زمنية وجيزة Δ ز يكون عدم اليقين في الطاقة Δ ط كبير وهكذا يصبح قادرًا - خلال هذه الفترة الزمنية الوجيزة، وإذا كانت Δ ط أكبر من حاجز النواة - على عبور الحاجز والخروج خارج النواة. والتعبير المستخدم عادة أن الجسيم اقترض كمية من الطاقة من مبدأ عدم اليقين وسوف يعيده ثانية، بعد أن يكون قد أصبح حرًا (بعد الفترة الزمنية القصيرة Δ ز).

ودعنا الآن نزيد الأمر ارتباكًا بالإمعان في ألغاز فيزياء الكم المحيرة للعقول. حتى الآن نحن ننظر للأمر من وجهة نظر الجسيمات وخصائص الموجات التي تظهر بها. ماذا عن الأمواج، وعلى وجه الخصوص الضوء عندما يكتسب خصائص الجسيمات؟ ولنأخذ المثال التالي لتوضيح المشكلات التي تواجه الفيزيائيين في هذا المجال. توجد بعض المواد التي تسمى مستقطبات (Polarizers)، وهي المواد التي تسمح للضوء (الأشعة الكهرومغناطيسية) بالمرور فقط إذا كانت الموجات تتذبذب في اتجاه معين، أما الموجات التي تتذبذب في أي اتجاه أخر فلا تمر. بعض النظارات الشمسية تعمل بهذه الخاصية. حيث إن ضوء الشمس يحتوي على ضوء يتذبذب في جميع الاتجاهات فهذه النظارات تمرر فقط الضوء المتذبذب في أحد هذه الاتجاهات مما يقلل من الانعكاسات القوية المتعبة للعين (الزغللة). وهكذا تعمل هذه المادة على استخلاص الضوء المستقطب، وهي بذلك تسمى مرشح استقطاب Polarized filter، بمعنى أن الضوء

(*) التشبيه مع الفارق؛ حيث إن عملية الرج تعني إكساب قطع الزهر طاقة حركة كبيرة، مما يؤدي إلى أن يخرج أحدها خارجًا، أما في حالة جسيم ألفا، فإنها مسألة احتمالات بدون إكساب الجسيم أي طاقة تجعله يتغلب على الحاجز إذا افترضنا على سبيل المثال أن احتمال وجود الجسيم خارج النواة واحد في المليون وهو احتمال ضئيل، فإنه من بين كل مليون ذرة سوف نجد جسيماً واحداً خارجاً عن النواة.

المستقطب هو موجات تتذبذب فى مستوى واحد فقط ومحدد، وهى تتذبذب صعوداً وهبوطًا فى هذا المستوى (أو طبقًا للاتجاه الذى وضع فيه المرشح). والآن إذا وضعنا أمام هذا الضوء المستقطب مرشحًا آخر، ولكن يسمح بمرور الضوء المتذبذب فى الاتجاه العمودى على الضوء المستقطب الذى حصلنا عليه من المرشح الأول، فإننا نلاحظ عدم مرور الضوء من خلال المرشح الثانى. ولكن إذا أدرنا المرشح الثانى بحيث تكون الزاوية أقل من ٩٠° درجة، فإن قليلاً من الضوء يمر من خلاله. وإذا جعلنا الزاوية ٤٥°، فإن نصف الضوء سوف يمر (نصف طاقة الضوء). ولكن اتجاه الاستقطاب الآن سوف ينطبق على الاتجاه المفضل للمستقطب الثانى (أى بزاوية ٤٥°) بالنسبة لاتجاه استقطاب المرشح الأول.

لتفسير هذه الظاهرة المعروفة بالاستقطاب الضوئى نجد أن معادلات ماكسويل الشهيرة تصلح تمامًا أساسًا للفهم. المرشح الثانى (٤٥°) سوف يستبعد نصف الطاقة الضوئية الأصلية وإذا كان المرشح الثانى عمودى (٩٠°)، فإنه سوف يستبعد كل الطاقة الساقطة عليه(*). وقد نسأل أنفسنا الأسئلة التالية:

* ماذا حدث للفوتونات عند مرورها من المرشح؟

حيث لا يمكن تقسيم الفوتون فهو وحدة الطاقة الأساسية، إذن عند مرور شعاع من الضوء من خلال مرشح يصنع زاوية قدرها ٤٥° نصف عدد الفوتونات مر من المرشح، والنصف الآخر لم يمر.

* إذا كانت الفوتونات كلها متماثلة فكيف يتم اختيار الفوتونات التى تمر من المرشح؟ والإجابة بالصدفة العشوائية طبقًا للمبادئ الإحصائية لنظرية الاحتمالات. فعند سقوط فوتون واحد، فإن احتمال مروره (٥٠٪) (فى حالة وضع المرشح الثانى بحيث

(*) تتعامل معادلات ماكسويل مع الضوء على أنه مجالان أحدهما كهربى والآخر مغناطيسى متعامدان، وعند مرور الضوء المرشح، فإنه لشدة المجال الكهربى سوف يمر جزء منه فقط يتناسب مع جتا الزاوية (جيب تمام الزاوية) وهذا يفسر الظاهرة.

يكون اتجاه استقطاب على زاوية ٤٥° من اتجاه استقطاب الضوء الساقط عليه). وهذه النسبة تختلف باختلاف الزاوية، ولكن التفسير واحد. ويتم مرور الفوتونات من المرشح بطريق المصادفة البحتة. وهذا المثال يوضح الدور المهم الذى تلعبه نظرية الاحتمالات فى عالم فيزياء الكم (الجسيمات الدقيقة). القاعدة العامة فى عالم الجسيمات الدقيقة هى أنه عند تفاعل الجسيمات الدقيقة، فإن نتيجة التفاعل تعتمد تمامًا على المصادفة فى إطار نظرية الاحتمالات. فقد نلاحظ تزاحمًا كبيرًا لتفضيل نتيجة معينة، أو قد نلاحظ أن الاحتمالات ٥٠٪ بدون تفضيل لنتيجة عن سواها، ولكن فى جميع الحالات، فإن جميع تفاعلات الجسيمات الدقيقة تخضع تمامًا لقوانين نظرية الكم، ولا يوجد شىء مؤكد فى عالم الجسيمات الدقيقة.

والدور الرئيسى الذى تلعبه المصادفة فى فيزياء الكم هو ما جعل ألبرت أينشتاين يرفضها بالكامل قائلاً قوله الشهير عن الرب "إن اختيار الرب أن يلعب لعبة الزهر مع العالم هو شىء لا أستطيع تقبله ولو للحظة واحدة" كما صاغها مرة أخرى "إننى لا أصدق أن الرب يلعب لعبة الزهر". ومع هذا، فإن كل ظواهر هذا العالم الدقيق تؤكد بأن الرب يلعب لعبة الزهر. فكل التجارب تؤكد على دقة نظرية الكم. فعندما نجرى تجربة لتحديد موقع الإلكترون مثلاً فنحن لا نستطيع معرفة ماذا سوف ينتج عن التجربة(*). وفى هذه الحالة فإنه يمكننا أن نقول إنه توجد قيمة احتمال فى المرة القادمة سوف نجد الإلكترون تحرك من نقطة أ إلى نقطة ب أو إلى نقطة ج بقيمة احتمالية أخرى. قيمة الاحتمالات يمكن حسابها بدقة كبيرة (نظريًا)، وقد تكون أكبر من ٩٩٪. ولكنها أبدًا لا تكون ١٠٠٪ كحقيقة مؤكدة أن الإلكترون سوف ينتقل من نقطة أ إلى نقطة ب

(*) تقدم نظرية الكم تفسيرًا ممتازًا لعالم الأجسام الدقيقة مع ملاحظة أن عدد الجسيمات فى أى تفاعل هو عدد كبير جدًا، فنحن نتكلم عن ملايين الملايين من الإلكترونات والفوتونات، وهنا فإن تفسير نظرية الاحتمالات يحاكى الواقع، ويمكن قبوله بسهولة ويسر وتنشأ الصعوبة الرئيسية فى التعامل مع نظرية الكم عندما نحاول تطبيقها على جسيم واحد أو عدد قليل من الجسيمات، فكيف يمكن فهم أن احتمال وجود الإلكترون فى أحد النقاط هو ١٠٪ مثلاً ولكن يمكن أن نفهم أنه إذا كان هناك مليون إلكترون، فإنهم سوف يكونون موزعين بحيث فى هذه النقطة سوف نجد ١٠٠ ألف إلكترون، وهذا ما تؤيده التجربة والنظرية.

وإذا أعدنا تكرار هذه التجربة التى يتحرك فيها الإلكترون من أ إلى ب فقد نجده مرة فى نقطة ج ومرة أخرى فى نقطة د.

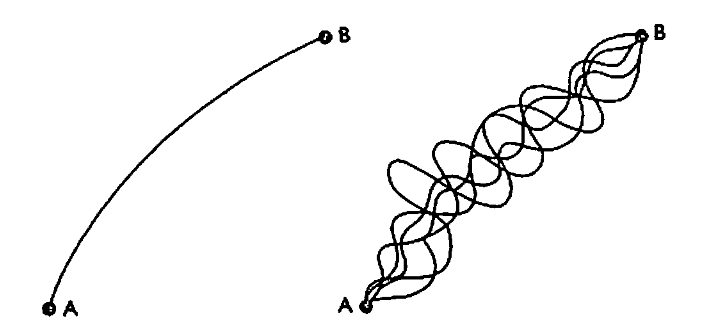
أما فى حياتنا اليومية فقد نجونا من محنة الاحتمالات هذه حيث أعداد الجسيمات الدقيقة ضخمة. فمثلاً بليونات وتريليونات الإلكترونات تتحرك فى دوائر الكمبيوتر لتنفذ لنا برامج الكتابة أو الرسومات أو غيرها. ولكننا إذا استطعنا متابعة هذه الأعداد الضخمة من الإلكترونات، فإننا سوف نجد عدداً قليلاً منها لا يسير فى المسار المحسوب من أ إلى ب، ولكن قد يقفز إلى نقط أخرى، ولكن الغالبية العظمى سوف يؤدون العمل المطلوب، وهذا لا يؤثر فى عمل الجهاز. ولا يسترعى اهتمامك فى حياتك اليومية خضوع الإلكترونات لنظرية الاحتمالات إلا إذا كنت مهتما بالنواحى الفلسفية. وحتى إذا كنت (مثلى) مغرما بالميتافيزيقا، فإنه لن يساورك أى خوف من أن الإلكترونات فى جهازك الحاسب سوف تتوقف فجأة عن تنفيذ الأوامر. ولكن عندما نمعن النظر فى عالم الجسيمات الدقيقة، وعندما ندرس تركيب الذرات ومكوناتها، فإننا يجب أن نتعرف إلى الملامح الغريبة لنظرية الكم.

سوف نحتاج الآن التعرف إلى أحد المبادئ الأساسية وعدد من الظواهر الغريبة فى جعبة فيزياء الكم، قبل أن نحاول أخيرا سبر أغوار هذا العالم المميز.

تكامل المسار وتعدد العوالم(*)

إن الفرق الرئيسى بين ميكانيكا الكم والميكانيكا الكلاسيكية (التى وضعها إسحاق نيوتن) يظهر واضحًا عندما ندرس حركة الإلكترون فى الانتقال من نقطة (أ) إلى نقطة (ب). فالجسيم، من وجهة النظر الكلاسيكية، فى النقطة (أ) له سرعة معلومة تمامًا مقداراً واتجاهاً. وعندما تؤثر قوى خارجية عليه، فإنه يتحرك فى مسار محدد، لنقل إنه يمر

(*) Path Integrals and a plurality of the worlds.



شكل (١–٥) تقوم الميكانيكا التقليدية على أساس أن الجسيم تحرك من نقطة (أ) إلى نقطة (ب) فى مسار محدد يمكن حسابه من قوانين نيوتن للحركة. أما فى ميكانيكا الكم وكما أوضح ريتشارد فينمان، فإنه يجب حساب جميع المسارات الممكنة للوصول إلى المحصلة النهائية. ويسمى هذا بالتكامل الخطى (تكامل المسار)، وهذه هى الطريقة التى يمكن بها تفسير كيف يمر إلكترون واحد (أو فوتون واحد) من ثقبين، وبالتالى يحدث لأى منها ظاهرة التداخل من شقيه والسابق شرحها فى شكل ١–٢ .

أو ينتهى بالنقطة (ب). أما فى حالة تطبيق نظرية الكم، فإن الوضع يختلف فنحن لا يمكن أن نعرف إطلاقًا – ولا حتى من ناحية المبدأ – مكان وسرعة الجسيم فى آن واحد على وجه اليقين. هناك سبب رئيسى متأصل لعدم اليقين فى حركة الجسيم. وإذا لاحظنا أن الجسيم قد بدأ من نقطة (أ) وانتهى إلى نقطة (ب) فلا يمكن معرفة كيف انتقل من (أ) إلى (ب) وفى أى مسار، إلا إذا أجرينا قياس وتحديد المكان عند كل وجميع نقط المسار.

يرجع الفضل إلى ريتشارد فينمان من معهد كاليفورنيا، والحائز على جائزة نوبل فى الفيزياء إلى استخدام رسوم الفراغ المكانى الزمانى، والتى استخدمت من قبل فى نظرية النسبية؛ وذلك لتوقيع مسار الجسيمات عليها. وفى هذه الرسوم يستخدم أحد المحاور كمحور للزمن والمحور الثانى يمثل المكان، والمنحنيات التى تظهر فى هذه الرسوم تسمى الخطوط العالمية (world lines)، وهى تمثل المسار الزمنى للجسيمات، وبعض منها يستبعد إذا ما كان ينطوى على سرعة أكبر من سرعة الضوء، بينما يبقى العديد منها

لتمثيل المسارات المحتملة من النقطة (أ) إلى النقطة (ب). ولنعود إلى تجربة الشقين (الثقبين) مثلاً. هنا يمكنك أن تتخيل جميع المسارات الممكنة للإلكترونات بداية من مصدر الإلكترونات فى البداية إلى إحدى النقط المضيئة على الشاشة الفسفورية فى النهاية الأخرى؛ حيث يمر الإلكترون من أحد هذين الثقبين أو الثقب الآخر. بعض من هذه المسارات مباشرة، والأخرى بها تعرجات ومنحنيات كثيرة. رسوم فينمان تحتوى على محور الزمن بالإضافة إلى المكان، وعلى هذا فبعض المنحنيات (المسارات) قد تكون أسرع، وبعضها قد يكون أبطأ كما أن بعضها أطول ومتعرج، ولكن كل منها له قيمة احتمالية للحدوث يمكن حسابها، وتسمى "السعة الاحتمالية". ويمكن التعبير عن السعة الاحتمالية من خلال كمية تسمى "الحركية" "Action" وهى تساوى حاصل ضرب الطاقة فى الزمن، وهى فى الحقيقية نفس وحدات ثابت بلانك هـ.

القيمة الاحتمالية للمسارات العالمية ليست متوافقة مع بعضها، ولكنها مثل الموجات التى تشاهدها على سطح المياه؛ فهى تتداخل مع بعضها البعض مما يعزز السعة الاحتمالية لبعض المسارات ويلغى قيم بعض المسارات الأخرى. وهذا التداخل ليس مختلفا كثيراً عن تداخل الموجات فى الحزمة الموجية، والتى ينتج عنها إلغاء الموجات خارج الحيز الفراغى Δ س كما سبق شرحه. وقد أوضح فينمان(٥) أنه بجمع سعات جميع المسارات المحتملة للجسيم، فإن ناتج التداخل سوف يكون إلغاء جميع المسارات عدا تلك التى تقترب من المسار المحدد بواسطة الميكانيكا الكلاسيكية من نقطة أ إلى نقطة ب. وعند استخدام هذه الطريقة لحساب نتائج تجارب التداخل بالشق المزدوج، فإن النتائج تتطابق تماماً مع النتائج التى نحصل عليها باستخدام المعادلة الموجية لشرودنجر.

وواقع الحال أن طريقة فينمان لحساب جميع المسارات المحتملة وتداخلها تنطوى على تعقيد وصعوبة كبيرة جداً فى إجرائها، ولهذا فقد استخدمت فقط فى عدد من الحالات الخاصة البسيطة. تخيل على سبيل المثال العدد الهائل من المسارات المحتملة

---

(٥) يمكن الرجوع إلى التفاصيل الفيزيائية فى العمل الرائع بواسطة فينمان وهيبز
R.Frynman and A.R. Hibbs, Quantum mechanics and path Integrals. McGraw Hill, 1965.

للإلكترونات من مصدر الإلكترونات إلى شاشة الكاشف؛ حيث يتم حساب جميع المسارات إلى جميع نقط الشاشة مما ينجم عنه صعوبة تطبيق طريقة فينمان بدقة. على أنه ينبغى التأكيد على أهمية هذه الطريقة، وأنها تقود إلى ذات النتائج التى تحصل عليها من خلال حل معادلات شردونجر فى الميكانيكا الكمية(٦). أخبرنا فينمان أنه فى حالة تجربة الشق المزدوج لا يجب أن نأخذ فى الاعتبار فقط حركة الإلكترون من خلال الثقبين فى وقت واحد، ولكن حساب جميع المسارات الممكنة من خلال الثقبين فى آن واحد، والإضافة التى أدخلها فينمان مهمة من الناحية النظرية؛ حيث إن النظرة الكمية ترفض تماماً مسألة المسار المحدد للجسيم، بينما يؤكد فينمان على أهمية الأخذ فى الاعتبار جميع المسارات المحتملة.

وهذه الطريقة لوصف مسارات الجسيمات تسمى طريقة " تكامل المسار " ذلك أنها تعتمد على جمع جميع المسارات المحتملة، وتسمى أحياناً "الجمع التاريخى" هذا الاسم البديل هو رجع صدى لأحد تفسيرات ميكانيكا الكم، وإن لم تكن وجهة نظر غالبية الفيزيائيين اليوم، ولكننى مغرم بها وقمت بشرحها ومناقشتها فى كتابى "البحث عن قطة شرودنجر"(*). وهذا النموذج يتوافق مع فكرة "العوالم المتعددة" التى وصفها هيوج أيفيرت من جامعة برينستون عام ١٩٥٧، كما تناولها مجدداً بحماس زائد دايفيد دويتش من أكسفورد(٧).

---

(٦) بطبيعة الحال هناك طرائق يمكن استخدامها؛ لاستخدام طريقة فينمان فى مجال واسع، وذلك دون اللجوء إلى حساب جميع المسارات المحتملة، وعلى سبيل المثال فقد أثبت فينمان أن المسار الأكثر احتمالية المناظر للمسار التقليدى – الذى يمكن حسابه بواسطة الميكانيكا التقليدية – يتبع مبدأ أقل حركية (least action)، وعلى هذا فيمكن فقط الأخذ فى الاعتبار المسارات القريبة من أقل حركية؛ حيث إن السعات الاحتمالية للمسارات الأخرى البعيدة عن مسار أقل حركية سوف تلاشى بعضها بعضاً. والمشكلة فى تجربة الشق المزدوج أنه توجد مسارات خلال كلٍّ من الثقبين لها نفس القيمة الأقل حركية، وعلى هذا فجميعها يجب أخذها فى الحساب.

(*) المؤلف هنا يشير إلى كتابه المهم.

"In Search of Scrödenger's cat" by John Gribbin.

(٧) انظر كتاب The Fabric of Reality by Allen Lane، ١٩٩٧ .

وفكرة أيفريت تقوم على أنه يمكن تفسير المعادلات الكمية عندما يواجه الكون "اختياراً" بين بديلين على مستوى ميكانيكا الكم، فإنه ينقسم إلى عالمين (كونين)، وكل منهما يتبع أحد البديلين. فى تجربة الشق المزدوج وحينما ينتقل الإلكترون من نقطة (أ) إلى نقطة (ب)، والتى يفصل بينها حاجز ذو ثقبين، فإن الفيزياء الكمية تخبرنا بأنه لا يمكننا أن نعرف فى أى من الثقبين مر الإلكترون فى رحلته من أ إلى ب، إلا إذا كنا نتابع حركته طول الوقت، وفى الحقيقة فإنه - وطبقًا لنظرية الكم - لا معنى لقولنا إنه مر من أحد الثقبين(*). وطبقًا لنظرية جمع المسارات فإن المسار الحقيقى هو مجموع المسارين المحتملين من خلال الثقبين. وطبقًا لنظرية الميكانيكا الكلاسيكية، فإنه لابد أن يكون للإلكترون مسار واحد فقط مر منه حتى ولو لم نكن متابعين لحركته. إذا ما أردنا أن نتابع حركة الإلكترون لنرى من أى الثقبين سوف يمر، فإن عدم اليقين الموجود فى صلب نظرية الكم سوف يتلاشى فى هذه الحالة؛ حيث إننا نركز على تحديد مكان الإلكترون فى كل نقطة من المسار، وتصبح التجربة مختلفة عن تجربة التداخل من خلال الثقبين؛ حيث نركز على الثقبين لتحديد أى المسارات مر منها الإلكترون. ولكن طبقًا للمعادلات ولتفسير أيفيرت، فإنه فى كل مرة نلاحظ فيها مرور الإلكترون من أحد الثقبين يوجد ملاحظ آخر - فى عالم آخر - يلاحظ مرور الإلكترون فى الثقب الثانى، وكل منها صحيح، كما يمكننا القول بأنه فى حالة مرور الفوتون من مرشح الاستقطاب وعندما تكون احتمالات مرور الفوتون ٥٠٪ فإن العالم ينقسم إلى اثنين فى أحدهما يمر الفوتون من المرشح، وفى الآخر لا يمر الفوتون. إن الأمر المحير فى هذا التفسير لحقيقة فيزياء الكم أنها تصل إلى نفس التنبؤات والملاحظات دائمًا مثل التفسير الاحتمالى لجميع التجارب التى يمكن إجراؤها. ويمثل هذا عامل قوة وعامل ضعف فى آن واحد. فهو عامل قوة؛ حيث إنه يتوافق مع جميع النتائج العملية التى يمكن الحصول عليها حتى الآن. وهو عامل ضعف؛ حيث إنه فى رأى العديد من علماء الفيزياء أن نظرية أيفيرت لا تقدم جديداً يضاف إلى الرؤية الاحتمالية لنظرية الكم، ولا تقدم تنبؤات جديدة

(*) لأن هناك احتمالات لتواجد الإلكترون فى جميع الأماكن، وطبقًا لموجة الاحتمالات السابق الإشارة إليها.

تميزها عن غيرها من النظريات، وبالتالى فإنه لا يوجد ثمة حاجة إليها ونستطيع الاكتفاء بالتفسير الاحتمالى؛ حيث إن هذا التفسير الاحتمالى يحافظ على فكرة الجسيم المتركز فى نقطة، ولكن وجوده يعتمد على الموجة الاحتمالية، إذا كان يهمك حقيقة أن تحافظ على هذه الفكرة.

الخروج من المقلاة

كتب العالم الإنجليزى بول دافيز من جامعة أريزونا فى أحد الكتب الدراسية عن الفيزياء الكمية(٨) مناهضا بشدة هذه الفكرة؛ حيث "يجب مقاومة الفكرة القائلة بأن الإلكترون هو مجرد حزمة موجية فى الفراغ. الإلكترون فى حد ذاته ليس موجة، ولكن الطريقة التى يتحرك بها تخضع لقوانين مشابهة للموجات. ما زال الفيزيائيون ينظرون للإلكترون على أنه جسيم مادى مركز فى نقطة واحدة، ولكن تحديد مكان الإلكترون لا يمكن القطع به" ويستمر فى شرح الموجة الاحتمالية التى تصف أماكن تواجد الإلكترون بعقد مقارنة مع ما يسمى الموجة الإجرامية فى حياتنا العامة، فيقول: "الموجات الإجرامية ليست موجات بالمعنى المعروف من تذبذب ما (مثل موجات المياه) ولكنها موجات احتمالية... الموجات الإجرامية مثلها مثل الموضة أو البطالة أو غيرها، يمكنها أن تتحرك من مكان لآخر (فهى ديناميكية)، ولكن ذلك لا يمنع حدوث الجرائم فى أى مكان. ولكن ما يتحرك هو القيم الاحتمالية لوقوع الجرائم".

فى مجالات عديدة وخاصة لتدريس الفيزياء فى المرحلة الجامعية يفضل الفيزيائيون وصف الإلكترونات بأنها جسيمات مادية محدد، فى نقطة والموجات الملحقة بها هى موجات احتمالية تصف مكان الإلكترون، وهذه الموجات الاحتمالية هى التى تتداخل مع بعضها، ويحدث لها ظاهرة الحيود، خلال مرورها من الثقوب، وتحدث لها كل المظاهر الموجية. إنها القيم الاحتمالية التى تتصرف كالموجات كما يقول دايفز لطلبته

---

(٨) Quantum Mechanics, Rutledge & Kagan Paul, London 1984.

"بينما تظل الجسيمات نقطًا مادية، وإن كانت مختفية بطريقة محيرة فى الموجة التى تحدد مسارها... ويتحدد الوجه الذى يظهر لنا من ازدواجية الجسيم - الموجة (الجسموجية) بناء على السؤال المطروح". هذه طريقة سيئة للتدريس. إذا ما سألنا عالمًا كبيرًا مثل ماكسويل أبى الموجات الكهرومغناطيسية عن رأيه فى هذه الطريقة للتعليم، التى تقترح أن موجات الضوء هى مجرد موجات احتمالية تقود حركة الجسيمات المسماه "فوتونات"، إذا كان ماكسويل ما زال حيًا لكان رده ممتعًا حقًا. ومهما كانت محاولات صمود هذا التفسير سواء للإلكترونات أو الفوتونات أو غيرها كجسيمات فإن هذا التفسير ما زال موجودا، ولكن سوف يتوارى.

خذ مثلاً اللف(*) فالإلكترونات وغيرها من مكونات الذرة لها خاصية اللف. وهى مهمة جدًا؛ لأنها تحدد توزيع الإلكترونات فى المدارات حول النواة، ولها ذات الوحدات مثل عزم الحركة الدورانية الذاتية للنحلة الدوراة، ودوران الأرض حول نفسها فى الفضاء. فخاصية اللف للإلكترونات تأخذ فقط قيمتين فوق وتحت وليس أى اتجاه آخر، ولهذا فإن اللف هو خاصية كمية محددة فى قيمتين فقط وتتحدد بالنسبة لثابت بلانك هـ . فمثلاً فى هذه الوحدات، فإن قيم لف الإلكترون تكون فقط إما + ١/٢ أو - ١/٢ ولا شىء آخر. وجميع الجسيمات التى نعتبرها جسيمات حقيقة لها لف عدد صحيح ونصف ١/٢، ٣/٢، ٥/٢،....

وهذه الجسيمات تسمى فى ميكانيكا الكم "فيرميونات"، وتتبع قوانين خاصة فى الفيزياء الاحتمالية (الإحصائية) تسمى قوانين فيرمى - ديراك، أما الفوتون والذى له لف يساوى واحد صحيح، وجميع الجسيمات التى لها لف بقيم صحيحة ١، ٢، ٣،... تتبع مجموعة أخرى من القوانين تسمى بوز - أينشتاين، وتسمى بوزونات وعلى هذا يوجد فارق جوهرى بين الإلكترونات والفوتونات. والفرق الجوهرى هو أن الفيرميونات مثل الإلكترونات متفردة، بمعنى أنه لا يمكن أن يوجد أكثر من إلكترون فى ذرة لها

(*) الحركة الدورانية المغزلية Spin.

نفس الطاقة والحركة الدورانية واللف. وعلى ذلك، فإنه فى مدارات الطاقة داخل النواة لا يمكن وجود أكثر من ٢ إلكترون فى المدار الواحد، أحدهما له لف فوق والآخر تحت(٩). ولا يمكن لإلكترون ثالث التواجد؛ لأنه سوف يتطابق مع أحد الإلكترونين. أما البوزونات مثل الفوتونات لها لف قيم صحيحة، فيمكن لأى عدد منها أن يتواجد معا. وبالإضافة إلى ذلك فإن عدد الفيرميونات ثابت فى الكون (قانون بقاء المادة). أما البوزونات فهى سريعة الزوال. يمكنك خلق فوتونات بإضاءة المصباح وتختفى عندما تمتصها الذرات وتأخذ طاقتها (مع المحافظة على قانون بقاء الطاقة).

يصعب استيعاب ما سبق مع نظرية الجسيمات المادية المصحوبة بالموجات الاحتمالية. وتزداد الصعوبة عندما يخبرنا الفيزيائيون بأن خاصية اللف للجسيمات الدقيقة لها خصائص أخرى. إذا نظرت للإلكترون كجسيم يدور، فإنه يجب أن يدور ٣٦٠° ليس مرة واحدة بل مرتين حتى يعود إلى نقطة البداية. وعلى الرغم من أننى قلت لك إن الفيرميونات عددها ثابت بصفة إجمالية فى الكون، فهذا لا يمنعك من تكوين جسيمات وجسيمات مضادة بأعداد متساوية مع توافر الطاقة اللازمة لذلك. فكل إلكترون (جسيم) وبوزيترون (جسيم مضاد) مجموعهما صفرا، وبالتالى لا يؤثران فى العدد الإجمالى للفيرميونات فى الكون. الجسيم والجسيم المضاد يلاشيان بعضهما فى عدد الفيرميونات. وإذا كان لديك الطاقة اللازمة يمكنك تكوين ثنائيات إلكترون - بوزيترون بأى عدد، تماماً كما حدث فى الانفجار الكونى العظيم (Big Bang)، ولكن من أين يمكن الحصول على الطاقة الآن؟. إذا كنت واقعياً فيمكنك تخيل كميات الطاقة الهائلة التى نحصل عليها من اصطدام الجسيمات بعضها مع الآخر داخل المعجلات الضخمة مثل معجل CERN. ولكن يمكنك أن تحفز خيالك أكثر. ففى نطاق مبدأ عدم اليقين يمكنك

(٩) نحن فى الحقيقة نبسط الأمور؛ حيث يوجد عدد من مستويات الطاقة للذرة، ويمكن لكل مستوى أن يحتوى على أربع مدارات يدور فى كل منهما إلكترونان، وعلى هذا يمكن لثمانية إلكترونات أن يكون لها حالات قريبة جداً من بعضها، ولكن المهم أنه لا يمكن أن يوجد إلكترونان متطابقان فى الطاقة والمدار والحركة المغزلية.

إذا تمكنت من إجراء العملية التالية بالسرعة الكافية، يمكن استعارة كمية من الطاقة خلال مبدأ عدم اليقين لتكوين جسيمات تنشأ ثم تختفى بسرعة كبيرة حينما ينتهى الزمن المسموح به.

خذ الإلكترونات إذا كانت كتلة الإلكترون ك، فإن الطاقة اللازمة لتكوين ثنائى إلكترون – بوزيترون هو ضعف الطاقة الكامنة فى إلكترون (٢ك ع٢)، وهذا يمثل حوالى (١ ميجا إلكترون فولت)، وهى الوحدات التى يستخدمها عادة علماء الجسيمات الدقيقة. وتسمح قوانين الفيزياء الكمية لهذا الثنائى بأن يتكون فجأة فى الفراغ خلال فترة زمنية قصيرة جداً، ويتلاشى بعدها (ويساوى هذا الزمن ثابت بلانك مقسوماً على ١ ميجا إلكترون فولت) وبعدها يلاشى كل منهما الآخر، ويسمى هذا الثنائى الجسيمى جسيمات وقتية؛ حيث يوجد كل ثنائى (جسيم وجسم مضاد) لفترات زمنية بالغة القصر. يعج الفراغ بمثل هذه الثنائيات التى تتكون ثم تتلاشى ثم يظهر غيرها، هكذا فى تكون وتلاشٍ مستمرين وعلى الأقل هذه هى نظرة الفيزياء الكمية للفراغ. ولهذا التكون والتلاشى للجسيمات الوقتية دور كبير فى معادلات الفيزياء الجسيمية، فبدون الجسيمات الوقتية لا يمكن لهذه المعادلات التنبؤ بشكل دقيق بالتفاعلات بين الجسيمات المشحونة، ولكن مع الأخذ فى الاعتبار الجسيمات الوقتية فهى يمكنها ذلك.

ولنتساءل عن حقيقة وجود الجسيمات فى الكون، عندما يتحدث بول دايفز مع زملائه من الباحثين والفيزيائيين، فإنه يتكلم بأسلوب مختلف عن أسلوبه مع طلبته، لقد كتب دايفز مقاله فى كتاب نشر بمناسبة عيد الميلاد الستين للعالم المتميز بروس دى ويت (وهو أحد رواد نظرية العوالم المتعددة لتفسير الفيزياء الكمية)(١٠). ولقد اختار عنوانا مثيراً لمقالته "الجسيمات غير موجودة"، وجوهر المقالة يتفق مع رؤية العديد من علماء الفيزياء النظرية، ويبدأ من حيث إنه لا يمكننا رؤية أو لمس أو الإحساس بالجسيمات الأساسية مثل الإلكترونات، ولكن كل ما يمكننا عمله هو إجراء التجارب

Quantum theory of Gravity, Adam Hilger Bristol 1984. (١٠)

وتسجيل الملاحظات واستخراج النتائج حول ما يحدث استناداً إلى هذه الملاحظات وخبرتنا اليومية. ولهذا فإنه من الطبيعى أن نحاول إسقاط ما نراه فى حياتنا اليومية مثل الموجات والأجسام على هذا العالم الصغير جداً داخل الذرة، ولكن فى حقيقة الأمر، فإن كل ما نعرفه عن عالم الجسيمات الصغيرة هو أننا إذا أثرنا بمؤثر ما فإننا نحصل على نتيجة معينة يقول دايفز: "ما أرغب فى سحب الثقة منه هو ما يمكن أن يسمى بالحقيقة البدائية" (naïve-realism) ثم يستنتج "أن مصطلح الجسيم هو نموذج مثالى مطلق لإحدى خواص الفراغ المنبسط فى نظرية المجالات الكمية، فكرة الجسيمات "ضبابية أو سديمية" ويجب الابتعاد عنها تماماً.

إن العقبة الرئيسية أنه لا يوجد بديل أحسن لفكرة الجسيمات، وسوف آخذك إلى عالم الجسيمات الدقيقة مع الأخذ فى الاعتبار ما تقدم من تفسيرات الفيزياء الحديثة بدلاً من فكرة الجسيمات المادية المركزة فى النقطة التى تحكم حركتها موجات احتمالية، وهى الفكرة الموجهة لطلبة المرحلة الجامعية. خلال الخمسين عاماً الماضية كشفت البحوث الفيزيائية عن عالم ضخم من المكونات الذرية، ويحتوى على أشياء غاية فى الغرابة، وتسمى هذه الأشياء جسيمات حتى نستطيع العثور على اسم آخر. ما حقيقة هذه الأشياء، لا نعلم، إن أفضل النظريات تشرح نتائج هذه التجارب باستخدام التفاعلات بين هذه الجسيمات (الأشياء الخرافية)، وتتنبأ بنتائج تجارب جديدة فى ضوء الكيفية التى تتفاعل بها هذه الجسيمات مع بعضها البعض. فمع ملاحظة عالم التفاعلات ذات الطاقة العالية يستنتج العلماء القواعد والقوانين التى تحكم تفاعلات الجسيمات الدقيقة، ومنها يستنتجون ما سوف ينتج من تفاعلات جديدة، ويتم الحكم على النظريات الجيدة من خلال مدى توافق هذه الاستنتاجات مع الملاحظة العملية. النظريات الجيدة تساعدنا فى التوصل إلى الحسابات اللازمة لفهم كيف بدأ الكون وكيف انفجر ووصل إلى حالته الراهنة، ولكن ليكن معلوما أن هذه النظريات لا تدعى أنها تقدم الحقيقة المطلقة أو الكاملة، ولكنها تقدم تفسيراً منطقياً ومقبولا. كما لا يعنى ذلك أن هذه جسيمات دقيقة صلبة تتحرك داخل النواة وتصطدم ببعضها. إن الحقيقة

تكمن في المعادلات الرياضية، إن فكرة الجسيمات هي مجرد ركيزة يستخدمها الإنسان لتفسير وفهم المعادلات الرياضية. وكل ما تصفه المعادلات الرياضية هو مجالات للقوى تنتشر في الفراغ الزماني- المكاني في هيئة منحنيات تتثنى روحة وجيئة في تعقيد مدهش، حقيقة الجسيمات تتلاشى في خضم من الجسيمات التخيلية وعدم اليقين عندما تحاول أن تلاحظها عن كثب.

إن فكرتي الجسيم والموجة هما أفضل ما لدينا، و ما زالت هي أكثر الطرق مباشرة لتفسير الظواهر التي توصلت إليها الفيزياء الحديثة في محاولتها لفهم الكون في العالم الذي نشاهده. ولكنها في النهاية رموز (كنايات) تعبر عن أشياء لا نستطيع الإمساك بها أو سبر غموضها، ولهذا فإني أعتذر مقدما عن ضرورة الاستعانة بهما. إنني في حالة أشبه بأعمى يحاول شرح فكرة الألوان لشخص آخر أعمى من خلال نظرية لتفسير الألوان اعتماداً على اللمس والمدهش أن نظرياتنا تعمل بشكل مذهل.

الفصل الثانى

الجسيمات والمجالات

مع بدايات ١٩٣٠ بدا وكأن الفيزيائيين يملكون فهما متكاملاً للكون ومكوناته والقوى المؤثرة فيه، هذا مع استبعاد مشكلة واحدة فقط هى توفير التفسير المناسب لأفكار عدم اليقين والاحتمالات التى تشكل جزءًا من النظرية. كان هناك أربعة جسيمات [الإلكترون والبروتون و النيوترون والفوتون]، وكل منهم قد تم اكتشافه وتحديد خواصه منذ مدة طويلة. البروتونات والنيوترونات تشكل نواة الذرة التى هى قلبها، أما الإلكترونات فهى منتشرة فى الفراغ المحيط بالنواة، والذرة متعادلة كهربيا؛ حيث إن شحنة البروتون موجبة وتساوى فى القيمة شحنة الإلكترون السالبة، وعددهما فى الذرة متساوٍ. وتوزيع الإلكترونات فى مستويات طاقة مختلفة نتيجة لخواصها الفريدة أسبغ على كل ذرة خواص كيميائية مميزة لها ودعم قوة نظرية الفيزياء الكمية.

وقد ظهر مدى قوة هذه النظرية وصلابتها عندما قام العلماء بتطبيق مبدأ عدم اليقين. قطر الذرة حوالى ١٠$^{-٨}$ من السنتيمتر، وكتلة الإلكترون حوالى ١٠$^{-٢٨}$ × ٩ من الجرام. وبالتالى فإن طاقة الإلكترون التى تحفظه داخل الذرة يمكن حسابها من نظرية بور الأولية للذرة على أساس أن الإلكترونات تدور حول النواة بنفس الطريقة التى تدور بها الكواكب حول الشمس، ومثل هذا الحساب البسيط(*) يوضح لنا أن سرعة الإلكترون

(*) تؤثر على الإلكترون فى مداره قوة الجذب الكهربائى مع النواة لاختلاف شحنتهما (وقوة الجاذبية بينهما ولكنها تهمل لأنها أقل بكثير). وهذه القوة تعادلها قوة الطرد المركزى.

فى مداره حول النواة تقدر بحوالى ١٠سم/ثانية. وبالتالى فإن كمية حركة الإلكترون فى الذرة حوالى ١٠^-٢٠ جم سم/ث أو أقل بقليل، إذا كان للإلكترونات كمية حركة أكبر (أو طاقة أكبر)، فإنها تفر هاربة من أسر القوة الجاذبة الكهربية داخل الذرة بين النواة الموجبة والإلكترونات السالبة. عدم اليقين فى كمية حركة الإلكترونات Δح يساوى تقريباً قيمتها، وبضرب هذه الكمية فى عدم اليقين فى المكان Δ س وهو تقريبًا قطر الذرة، فإن حاصل ضرب Δ ح Δ س يساوى ١٠^-٢٧ جول/ثانية، وهو قريب جداً من قانون اللاحتمية لهايزنبرج ($\frac{h}{2\pi}$). إذا كانت الذرة أصغر، فإن عدم اليقين فى كمية الحركة سوف يكون أكبر مما يعطيه الفرصة للهروب من الذرة تماماً كما يحدث مع جسيمات ألفا التى تهرب من النواة (ظاهرة النفق). إن ميكانيكا الكم تقدم تفسيراً لحجم الذرة (أو تتنبأ به) وهو مقبول، لأنه متوافق مع الميكانيكا الكلاسيكية زمنًا طويلاً قبل ظهور ميكانيكا الكم.

البروتونات و النيوترونات لهما كتلة أكبر بكثير جداً من الإلكترونات (حتى مع التسليم بقلة سرعتها)، وبالتالى فإن عدم اليقين فى كمية الحركة أكبر بكثير؛ مما يستتبع بالضرورة أن عدم اليقين فى المكان أقل بكثير وبالتالى فهما مستقران فى حيز صغير ويظل حاصل ضرب Δ س . Δح أكبر من ($\frac{h}{2\pi}$)، وبالتالى فإن النواة أصغر بكثير من سحابة الإلكترونات وهو ما تبرره الفيزياء الكمية من خلال مبدأ اللاحتمية.

هكذا مع بدايات الثلاثينيات من القرن العشرين بدا أن الطبيعة بسيطة، وأن الفيزياء قد وصلت إلى تحديد اللبنات الأساسية فى الطبيعة. إلا أن هذا لم يدم سوى سنوات قليلة حتى بدأ سيل منهمر من الجسيمات الأولية فى الكشف عن نفسه حتى فاق عددها عدد العناصر المعروفة خلال عشرين عامًا فقط. وقد تطلب الأمر البحث عن نظريات جديدة أحدثت ثورة فى علم الفيزياء حتى يمكن إعادة بعض النظام إلى الجسيمات الأولية وإعادة ترتيبها بناء على بضع مبادئ بسيطة. تمامًا مثلما تتكون نواة الذرة من البروتونات و النيوترونات، فإنه (بالنسبة لمن يفضلون النظرية الجسيمية) يمكننا أن نقول إن هذه البروتونات والنيوترونات (وغيرها من الجسيمات) تتكون هى

أيضًا من مكونات أساسية يطلق عليها الكوارك. على أن فكرة الجسيم هى أيضًا شملتها ثورة التغيير خلال الخمسين عامًا الماضية. فكما أن الفوتونات ينظر إليها على أنها تجسيد للمجالات الكهرومغناطيسية، فإن الإلكترونات (وجميع الجسيمات) ينظر إليها على أنها تجسيد لمجالاتها الخاصة. فبدلاً من وجود عدد كبير من الجسيمات والمجالات تتفاعل مع بعضها البعض، فإن الكون يمكن النظر إليه على أنه مكون من عدد من المجالات فقط، وتمثل الجسيمات كمات الطاقة لكل مجال وهذه الجسيمات تجسد المجالات من خلال مبادئ الازدواجية الجسموجية ومبدأ اللاحتمية. ولهذا فقبل أن نتناول هذه التطورات وكيف غيرت نظرة الفيزيائيين خلال الخمسين عامًا الماضية فقد يبدو من المناسب تحديد ما نعنيه بفكرة المجال فى الفيزياء.

نظرية المجال

إن الفكرة النموذجية للمجال كوسيلة لانتشار القوى الكهربية ترجع إلى العمل الرائد للعالم ميشيل فاراداى المولود فى نيوينجتون فى إنجلترا عام ١٧٩١ . كانت حياة فاراداى العلمية شديدة التميز وهى تستحق منا وقفة لعرض كيف أصبح أحد العلماء.

ولد ميشيل فاراداى لأب فقير يعمل كحداد وتلقى بالتالى التعليم الأساسى المتاح للطبقة الفقيرة فى هذا الوقت. ثم ترك المدرسة عندما بلغ الثالثة عشر من عمره ليصبح صبيا فى محل تجليد الكتب، ولشراهته فى المعرفة فقد قرأ جميع الكتب التى أوكل إليه تجليدها. فى الرابعة عشر من عمره آثار اهتمامه مقالاً فى دائرة المعارف البريطانية؛ حيث قرأ بنهم عن الكهرباء والكيمياء وقام بنفسه بإجراء بعض التجارب طبقًا لما سمحت به ظروفه المعيشية. وفى عام ١٨١٠ التحق فاراداى بالجمعية الفلسفية للمدينة(*)، حيث حضر محاضرات فى الفيزياء والكيمياء فى وقت فراغه. وفى عام ١٨١٢

(*) City philosophical society.

وحينما بلغ الحادية والعشرين من عمره، فإن حياته تغيرت عندما حضر مجموعة من المحاضرات في المعهد الملكي على يد هيمفري دايفي، وهو كيميائي شهير، وقد اخترع لمبات الأمان التي استخدمت في المناجم على نطاق واسع قبل ظهور الكهرباء.

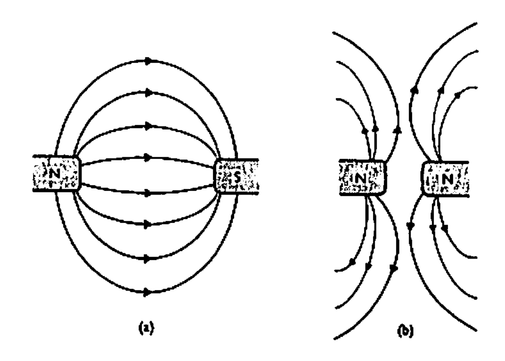
فتنت محاضرات دايفي فاراداي فكتب عنها ملاحظات كثيرة ومتعمقة وقام بجمعها في كتاب(١). رغب فاراداي بشدة أن يتفرغ للعمل العلمي فكتب إلى رئيس المعهد الملكي يسأله المشورة والمساعدة إلا أنه لم يتلق ردًا. انتهت فترة عمله كصبي في ١٨١٢، وأعد فاراداي نفسه للحياة كعامل تغليف كتب، ولكن حادثة ألمت بدايفي أصبح على إثرها فاقدًا للبصر بشكل مؤقت إثر انفجار كيميائي في معمله، فما كان منه إلا أن سأل الطالب المجتهد فاراداي أن يساعده في العمل إلى أن يستعيد بصره. وأبلى فاراداي بلاءً حسنًا في العمل، وحينما استعاد دايفي بصره أرسل فاراداي إليه الكتب التي أودع فيها محاضرات دايفي وملاحظاته، وقد أعجب بها دايفي حتى إنه في عام ١٨١٣ حينما أراد تعيين مساعد في المعهد الملكي عرض عليه الوظيفة. اقتنص فاراداي الفرصة على الرغم من ضعف مرتبها، والذي يقل حتى عما يتقاضاه كعامل تغليف (جنيه في الأسبوع)، أمضى فاراداي بقية حياته في المعهد الملكي، وأصبح مديرًا للمعمل في ١٨٢٥ وأستاذًا للكيمياء في ١٨٣٣ . كان عالما تجريبيًا فذا أكثر منه عالمًا رياضيًا، كان محاضرًا ممتازًا ومحبوبًا، وله قدرة على التفسير والتحليل كما أنه أنشأ ما يسمى محاضرات الكريسماس للأطفال، والتي أصبحت إحدى سمات المعهد الملكي حتى الآن. توفي عام ١٨٦٧، وكان قد أصبح زميلا للمعهد الملكي وعالمًا كبيرًا مرموقا في عصره، ولكنه كان متواضعا ففي خلال مسار حياته رفض رتبة الفارس حينما عرضت عليه، كما رفض مرتين متتاليتين منصب رئيس المعهد الملكي. وفي خلال محاولاته لوصف ما يحدث عندما تؤثر القوى الكهربية والمغناطيسية فقد وصل إلى فكرة - ما نسميه الآن نموذج - خطوط القوى، وهي الفكرة التي طورها ماكسويل بعد ذلك لتكون أول نظرية للمجالات.

---

(١) يمكن رؤية هذا الكتاب في متحف فاراداي في المعهد الملكي في لندن Royal Institution.

يمكن فهم الفكرة بسهولة عند دراسة القوى المؤثرة على شحنتين كهربيتين. الشحنات المتماثلة تتنافر، والشحنات المختلفة تتجاذب (الموجب والموجب يتنافران والسالب والسالب يتنافران أما الموجب والسالب ينجذبان) وخطوط القوى لفارادى هى خطوط رياضية تمتد من أى شحنة كهربية فى الكون. كل خط يبدأ من شحنة ما وينتهى عند شحنة مضادة لها. وكما فى حالة الشرائط المطاطية المشدودة، فهى تعمل على شد الشحنتين المتضادتين كل منهما للأخرى. وكما فى حالة الشرائط المطاطية المضغوطة، فهى تعمل على إبعاد الشحنات المتماثلة عن بعضها البعض. الفكرة كانت مفيدة جداً للحصول على صورة عما يجرى، وظهرت خطوط القوى كما لو كان لها معنى حقيقى؛ لأن جسماً بالغ الصغر مشحوناً بشحنة موجبة (شحنة اختبار) إذا ما وضع بين جسمين عظيمين غير قابلين للحركة، ومشحونين بشحنتين متضادتين، فإن شحنة الاختبار سوف تنحرف من الشحنة الموجبة وتسير فى اتجاه الشحنة السالبة سالكة مساراً يسمى المسار الأقل مقاومة (إذا ما أهملنا قوة الجاذبية) وسوف يكون منطبقاً تماماً على خطوط القوى لفارادى.

تشكل جميع خطوط القوى فى الفراغ ما يسمى بالمجال الكهربى فى النظرية القديمة للمجال (فارادى وماكسويل) فإن المجال مستمر لا ينقطع؛ بمعنى أنه لا توجد فراغات بين خطوط القوى كما أن الخطوط نفسها لا تنقطع ولا تتقاطع. ولهذا يمكن تشبيه المجال بوسط مطاط مرن يملأ الكون، وخلاله تنتقل القوى الكهربية والمغناطيسية. هذا الوسط المرن هو ما يسمى "الأثير". فكرة الأثير كوسط نشأت متطابقة مع أفكار القرن التاسع عشر الذى تميز بغلبة الفكر الميكانيكى، وما حققته الهندسة من انتصارات صناعية. ولكن مع ظهور الأفكار الثورية لنظرية النسبية وميكانيكا الكم فى القرن العشرين تم استبعاد فكرة الأثير من الكون تماماً. إذن المجال لا يحتاج لوسط مرن ومستمر لتفسيره وبالطبع لا تندرج فكرة المجال بهدف الطريقة المجردة بمصطلحات حياتنا اليومية إن أكثر التفسيرات شيوعاً لماهية المجال تعود بك إلى نقطة البداية إذ توقفت عن التفكير بها.



شكل (٢-١) فكرة خطوط القوى والتى ابتكرها فاراداى تفيد فى توضيح كيف تتنافر الأقطاب المغناطيسية المتشابهة وتتجاذب الأقطاب المغناطيسية المختلفة.

قبل تطوير نظرية المجال كنا نلاحظ أن الأجسام المشحونة والمغناطيسيات تؤثر على بعضها بقوى تتجاوز ما بينها من حواجز، وسمى هذا بالتأثير عن بعد. جاءت فكرة المجال لتلغى فكرة التأثير عن بعد، فكل شحنة تتأثر بالمجال الموجود فى مكانها، وبالتالى فالتأثير محلى وليس عن بعد. ويتأثر المجال بوجود الشحنات المؤثرة والمتأثرة به. والمثال الذى يضرب عادة هو الزنبرك فإذا شددت أحد أطرافه، فإنه يتمدد وإذا ضغطت أحد أطرافه فإنه ينضغط، والمجال كما أخبرنا فاراداى يعمل بطريقة مماثلة. يمكنه أن ينضغط وأن ينفرد وأن يربط جسيمين تماماً كما يربط الزنبرك نهايتيه. هذا التشبيه قريب من حياتنا اليومية ومحسوس. ولكن ما هى مادة الزنبرك؟ إنها مكونة من ذرات وكيف تؤثر الذرات على بعضها البعض؟ أساساً من خلال القوى الكهرومغناطيسية. عندما ينفرد الزنبرك تتحرك الذرات بعيداً عن بعضها، وعندما ينضغط تتقارب الذرات. ما يخبرنا به هذا التشبيه هو أن انضغاط أو انفراد المجال الكهرومغناطيسى يماثل تقارب الذرات أو تباعدها، وبطريقة أخرى يماثل انضغاط أو انفراد المجال الكهرومغناطيسى! ربما يجب التركيز على المعادلات التى تصف كيف تتفاعل الأجسام والمجالات بدلاً من زيادة الاهتمام للحصول على صورة عقلية بما يحدث.

هذه المعادلات (فى هذه الحالة) هى معادلة ماكسويل. فقد أعطانا ماكسويل أول نظرية متكاملة للمجالات، والتى تطبق على المجالات الكهربية والمغناطيسية وتخبرنا بأن

المغناطيسية تماثل الكهربية المتحركة. هذه هى النظرية الكلاسيكية (بمعنى أنها ليست كمية) للديناميكية الكهربية (ED) وتشرح نظرية النسبية العامة لأينشتاين القوة الأخرى المعروفة (الجاذبية) وهى نظرية مجالات كلاسيكية أيضًا بذات المعنى، وطبقًا للنظرية الفيزيائية الكلاسيكية هناك موجودان أساسيان فى العالم هما الجسيمات المادية والمجالات التى تربط بينها.

لكن طبقًا لفيزياء الكم فإن المجالات هى المكون الوحيد للعالم؛ حيث إن الجسيمات المادية هى تجسيد للمجالات. إن أول غرائب الفيزياء الكمية هى اكتشاف أن الجسيم المادى مثل الإلكترون يجب أن يعامل كموجة. إن أول تطبيق للمبادئ الكمية يعلمنا أن هذه الموجات المادية تعامل كمجالات، وأن لكل نوع من الجسيمات المجال الخاص به. فعلى سبيل المثال هنالك مجال مادى عام يملأ الكون، والذى يمكن وصفه بالمعادلات الموجية للإلكترون[٢]. ولكن مع اكتشاف أن الموجات الكهرومغناطيسية تتصرف كجسيمات فإن المجال مسئول عن وجود الجسيمات. طبقًا لفيزياء الكم فى الواقع، فإن المجال يوجد المادة، كما تخبرنا نظرية الكم أيضًا أن الطاقة الموجودة فى المجال لا يمكن أن تتغير بطريقة مستمرة ومتصلة من مكان لآخر كما فى النظرية الكلاسيكية. فالطاقة توجد على هيئة مقادير محددة ومنفصلة من الطاقة تسمى كمات، وكل مجال مادى له الكمات الخاصة به، وكل منها له كمية محددة من الطاقة أو الكتلة، وما الجسيمات إلا كمات من المجال محصورة فى مكان محدد طبقًا لمبدأ اللاحتمية. الفوتون هو كم المجال الكهرومغناطيسى، وبنفس الطريقة (إذا ما طبقنا مبادئ ميكانيكا الكم مرة ثانية على المجال المادى للإلكترون)، فإننا نستعيد الخاصية الجسيمية للإلكترون، ولكن ككم للمجال المادى للإلكترون، وهذا التفسير للجسيمات المادية ككمات للمجال تسمى مبدأ الكم الثانى[*] وهذا يعنى أنه كلما ازدادت معرفتنا بالمجالات ازدادت معرفتنا بالكون.

---

(٢) لتوخى الدقة فإن الدالة الموجية تصف مزدوج الإلكترون - بوزيترون وسنأتى إلى هذا بعد قليل.

(*) مبدأ الكم الثانى هو ترجمة Second Quantization بمعنى أننا طبقنا مبدأ الكم على الجسيمات، فوجدنا المجال المادى، ثم طبقنا مبدأ الكم للمرة الثانية على المجال، فوجدنا الجسيمات مرة أخرى.

توجد أنواع عديدة من المجالات المختلفة منها ما لا علاقة لها بالاتجاهات، وتسمى مجالات غير متجهة مثل المجال الذى يمثل درجة حرارة كل نقطة فى الغرفة. فإذا وضعنا ترمومتر فى نقطة ما، فإنه سوف يسجل درجة حرارة ما تكون أقل ما يمكن عند الأبواب حيث يهب الهواء البارد، وتكون أعلى عند الدفاية ولا يستشعر الترمومتر أى حركة نحو الدفاية أو بعيداً عنها. هذا المجال إذن له قيمة وليس له اتجاه. أما المجال الكهربى فهو مجال متجه؛ حيث يمكننا قياس شدة المجال واتجاهه فى أى نقطة. إن شحنة كهربية موجبة بالغة الصغر إذا ما وضعت فى أى نقطة سوف تحاول الحركة (فى اتجاه خطوط القوى) بعيداً عن أقرب شحنة موجبة، وفى اتجاه شحنة سالبة.

هنالك أيضاً خاصية مهمة تميز المجالات الكمية. حتى الآن تكلمت عن الإلكترونات والفوتونات ومجالاتهما بنفس الطريقة، ومع ذلك فهنالك فارق كبير بينهما وأساسى. الإلكترونات تنتمى لقبيلة تسمى الفيرميونات، وكل أفراد هذه القبيلة لها كمية حركة لف (مغزلية) تساوى ½ أو عدد صحيح زائد نصف. ولا تخلق الفيرميونات أو تتلاشى فى الكون اللهم إلا من خلال اصطدام المادة والمادة المضادة. أما الفوتونات فى المقابل فتنتمى لقبيلة البوزونات، ولها كمية حركة لف تساوى صفرا أو عدداً صحيحاً ويمكن خلقها وإفناؤها، وهى لا تخضع لمبدأ الاستبعاد(*). إذن يوجد نوعان أساسيان ومختلفان فى الكون، أحدهما الفيرميونات والآخر البوزونات. ويبدو أن هذا هو ما قاد الفكر البشرى إلى تمييز ما يعودنا أن نطلق عليه جسيمات وما يعودنا أن نطلق عليه قوى.

حينما يؤثر جسيمان كل منهما على الآخر. فطبقا للنظرية القديمة، فإن كلاً منهما يؤثر على الآخر بقوة(٢) أما الآن، فإن هذه القوى يمكن التعبير عنها بواسطة المجال

(*) نظرية الاستبعاد لباولى Pauli Exclusion low تنص على أنه لا يمكن أن يوجد إلكترونان (فيرميونان) متطابقان فى كل شىء (المكان والطاقة واللف). وهذا لا ينطبق على الفوتونات فيمكن أن يوجد أى عدد متطابق منها.

(٢) ترجع النظرية الكلاسيكية طبيعة هذه القوى لنوع التأثير المتبادل، فهناك قوى الجاذبية التى تجعل كل جسيمين ينجذبان لبعضهما البعض، وهناك قوى التجاذب والتنافر الكهرومغناطيسية، كما أن هناك القوى الرابطة داخل النواة بنوعيها القوى والضعيف، وكل هذا يدخل تحت باب التأثير عن بعد.

(التطبيق الأول لنظرية الكم)، وهذا المجال بدوره يمكن التعبير عنه بواسطة جسيمات من خلال التطبيق الثانى لنظرية الكمات، إذًا فطبقًا للصورة الجديدة عندما يقترب إلكترونان من بعضهما البعض فهما يتنافران وتفسير ذلك أن فوتونًا أو أكثر تم تبادلهما بينهما. الفوتون هو تجسيد للمجال الكهربى حول أحد الإلكترونات. وهو يقترض طاقته من مبدأ اللاحتمية؛ حيث يظهر فجأة ويتجه إلى الإلكترون الثانى، فيعمل على تغيير حركته مبتعدا عن الإلكترون الأول، وذلك قبل أن يختفى (الفوتون). كما أن الإلكترون الأول يحدث له رد فعل عكسى حينما يتركه الفوتون، وهكذا يتحرك الإلكترونان عكس بعضهما البعض[٤]. وهكذا أحد أنواع المجالات وهو الفيرميونات ينتج لنا الجسيمات المادية بينما النوع الآخر البوزونات فينتج لنا القوى التى تربط الأجسام المادية ببعضها البعض أو قد تكسر هذه الروابط من ناحية أخرى.

المجال الكهرومغناطيسى حول الإلكترون يمكنه توليد فوتونات لحظية لا تستمر إلا وقتا قصيراً، ولا تتحرك لمسافات بعيدة من مصدرها، والقاعدة الأساسية طبقًا لمبدأ اللاحتمية أن هذا الفوتون الوقتى يمكنه فقط أن يتحرك مسافة لا تتعدى نصف طوله الموجى من الإلكترون، وذلك قبل أن يتم امتصاصه مرة أخرى. ويرتبط طول الموجة بالطاقة، فكلما قلت الطاقة زاد الطول الموجى، وعلى هذا فالفوتونات الأقل طاقة تتجول مسافة أطول حول الإلكترون، وبالتالى فالصورة الكمية للإلكترون أنه منطقة مشحونة تغوص فى بحر من الفوتونات الوقتية التى تنشأ وتتلاشى طبقًا لمبدأ اللاحتمية وتكون أكثر طاقة قريبًا جدًا من الإلكترون.

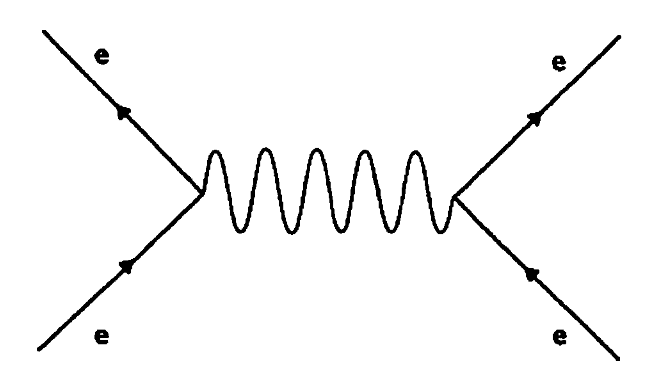
الفوتونات الوقتية وكذلك العادية يمكنها أيضًا خلق الإلكترونات؛ حيث إنه يمكن خلق زوج إلكترون (مادة) بوزيترون (مادة مضادة) بحيث إن الشرطين السابقين يتطابقان؛

---

(٤) هذا التصوير يسير بشكل جيد ولا يمكن مقاومته. بينما يصبح عديم القيمة لتفسير كيف تنجذب الشحنتان المختلفتان لبعضها البعض كما هو الحال فى الإلكترون، والبروتون ولسوء الحظ فإن عالم فيزياء الكم لا يمكن تصويره دائمًا بمثل هذه الصور الواضحة لأذهاننا.

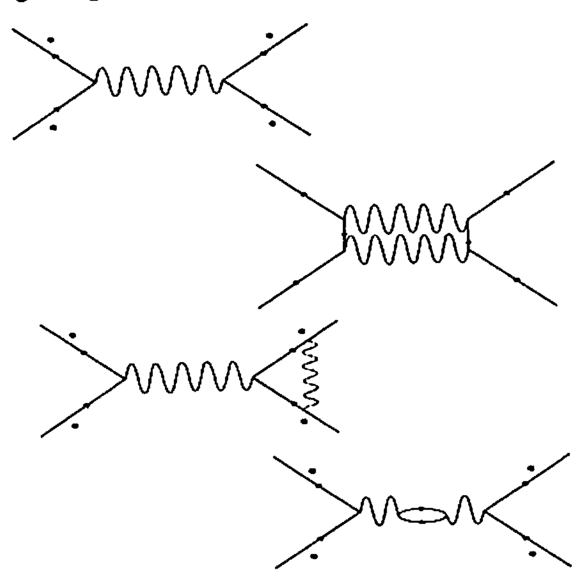
أى أن فترة حياتهما قصيرة جـداً ولا يتحـركان إلا فى حـدود مبدأ اللاحتمية (شكل ٢-٢)، وهذه الإلكـترونات تغوص أيضًا فى بحر الفوتونات الوقتيـة، وهكذا إلى ما لا نهاية.

هذا الزخم الضخم من الأنشطة حول الإلكترون هو الذى يساهم فى التنافر، والتشتت بين إلكترونين يختلف كلية عن الصورة الهادئة الوادعة فى مخيلة الكثيرين عن الفراغ. وهكذا فبتطبيق مبادئ النظرية الكمية على المجال الكهرومغناطيسى بالطريقة السابق الإشارة إليها، استطاع الفيزيائيون الوصول إلى نظرية الكهروديناميكا الكمية QED الفراغ النشيط والممتلئ حركة، وتصف هذه النظرية التفاعلات والتأثيرات بين الإلكترونات والفوتونات والمجالات الكهرومغناطيسية بلغة الكمات. وتعتبر هذه النظرية أحد أهم إنجازات الفيزياء الحديثة. وهى ناجحة جداً فى دراسة المجالات الكهرومغناطيسية إلى حد اعتبارها نموذجًا يحتذى به فى كل نظريات المجالات الكمية التى تصف مجالات أخرى، ولكنها تعانى من نقطة ضعف أساسية، وهى هذا الخضم الكبير من جسيمات المجال الوقتية حول الإلكترونات (سحابة الجسيمات الوقتية).



شكل (٢-٢) شكل فينمان التقليدى لتفاعل الجسيمات - فى هذه الحالة يتفاعل إلكترونان مع بعضهما عن طريق تبادل فوتون.

إذن تخبرنا الفيزياء الكمية أن الإلكترون محاط بسحابة من الفوتونات الوقتية، وأن أى من (أو كل) هذه الفوتونات قد يتحول إلى ثنائى وقتى إلكترون - بوزيترون، أو أى جسيمات وقتية أخرى وذلك قبل أن يعاد امتصاصه بواسطة الإلكترون(*) والطاقة تستمد من المجال أو من مبدأ اللاحتمية، وهكذا بدون وجود نهاية لعدد الدورات (إلكترون ← فوتون ← إلكترون بوزيترون وهكذا) وعند تطبيق قواعد الفيزياء الكمية بحذر لحساب كمية الطاقة اللازمة فى عمليات توليد الجسيمات الوقتية، فحيث لا يوجد حد لهذه الدورات، فإن طاقة الإلكترون وسحابة الجسيمات الوقتية المحيطة به سوف تكون لا نهائية، وحيث لا يمكننا الفصل بين الإلكترون وهذه السحابة، فإن هذا يعنى أن كتلة الإلكترون يجب أن تكون لا نهائية وهو ما يتعارض مع الواقع.



شكل (٢-٣) التفاعلات الجسيمية مثل اقتراب إلكترونين يشتمل على مخططات معقدة تدخل فيها دورات مغلقة للجسيمات الوقتية كما بالشكل، وهو ما نجم عنه وصول الطاقة إلى ما لا نهاية، وهو الأمر الذى تطلب اللجوء إلى حيلة إعادة التسوية غير المريح؟

(*) فترة الحياة المتاحة من خلال مبدأ اللاحتمية Δ الطاقة × Δ الزمن = ثابت بلانك ولهذا فكل فوتون وقتى للفيزياء لكمية لا يستطيع الوجود زمنًا أكثر من Δ الزمن طبقًا لمعادلة مبدأ اللاحتمية.

والطريقة الرياضية للالتفاف حول هذه المشكلة تبدو غير معقولة، ولكنها تعمل رياضيا فالكتلة اللانهائية للسحابة حول الإلكترونات يمكن مقابلتها عن طريق افتراض أن الإلكترون بمفرده (أى بدون سحابة الجسيمات الوقتية من حوله) له كتلة سالبة لا نهائية؛ بحيث إنه بجمع كتلة الإلكترون السالبة وكتلة السحابة الموجبة، وكلتاهما لا نهاية لهما وبطرح اللانهايتين يكون الناتج مقدارًا محددًا يمكن مساواته بكتلة الإلكترون المعروفة وهذه الحيلة الرياضية تعرف بإعادة التسوية. هذه الطريقة يعيبها أمران أولهما أنها تتضمن قسمة طرفى المعادلة على ما لا نهاية، وهو أمر نعرف من مبادئ الرياضيات فى المدرسة أنه ممنوع، ثانيهما أنه لا يمكن لهذه الطريقة التنبؤ بالقيمة الصحيحة لكتلة الإلكترون. إعادة التسوية ينتج عنها قيمة نهائية (عكس لا نهائية) لكتلة الإلكترون، ولكن يتعين على الفيزيائيين اختيار الكتلة المعروفة للإلكترون ووضعها فى المعادلة، أى أنهم يستطيعون فقط حل المعادلة، لأنهم يعرفون مسبقًا بقيمة كتلة الإلكترون، ولكن المدهش أنه بعد اختيار القيمة الصحيحة لكتلة الإلكترون، فإن المعادلات تعمل بشكل ممتاز وتؤدى إلى استنتاج كميات أخرى صحيحة ودقيقة، وذلك ما دفع العديد من الفيزيائيين إلى التعايش مع هذه الطريقة.

نظرية الكهروديناميكا الكمية QED، والتى تشمل إعادة التسوية تعمل بشكل جيد لفهم تفاعل الجسيمات المشحونة والمجالات الكهرومغناطيسية من منظور فيزياء الكم، ولذلك يفضل الفيزيائيون عدم التفكير بعمق فى مثل هذه المسائل. ولكن فى الواقع إذا أمكنهم الوصول إلى نظرية أخرى لا تظهر فيها القيم اللانهائية ولا نحتاج إلى استخدام إعادة التسوية والقسمة على ما لا نهاية، فإن هذا سوف يجعلهم فى منتهى السعادة. الكهروديناميكا الكمية حتى الآن هى أفضل نظرية وأشمل نظرية للمجال فى نظرية الكم، ولكنها تظل غير تامة الكمال. ويبدو أن البحث عن نظرية كاملة لشرح جميع أنواع التأثيرات والتفاعلات فى الكون، حتى كيفية نشأة الكون نفسه يبدو أن هذا البحث قد بدأ يثمر عن نتيجة. ولكن قبل أن نتذوق بعض ثمرات هذا البحث يتعين علينا أولاً أن نستعرض غابة الجسيمات الدقيقة التى تم اكتشافها خلال الستين عامًا الماضية، وكذلك نستعرض القوتين الباقيتين من القوى الكونية حتى يمكن استكمال خصائص المجالات الكمية.

قوتان إضافيتان وغابة من الجسيمات

منذ بداية القرن العشرين استطاع العلماء تمييز ٩٢ عنصراً كيميائيًا، وكل عنصر يتكون من ذراته المميزة له، واعتبرت هذه العناصر هي حجر الأساس في تكوين كل المواد الأخرى المركبة، على الرغم مما يبدو من الإسراف في عدد العناصر الأساسية التي تحتاجها الطبيعة لبناء الكون. ويرجع الفضل للعالم السيبيري ديمترى مندلييف (١٨٣٤-١٩٠٧) فقد بدأ العلماء الكيميائيون في الربط بين الوزن الذرى والخواص الكيميائية للذرة. وقد قام مندلييف بترتيب العناصر ترتيبًا تصاعديًا طبقًا للوزن الذرى بدءًا من الهيدروجين، واكتشف أن العناصر التي تتشابه في خواصها الكيميائية تتكرر في كل عدد ثابت من العناصر مما أوحى له بوضع العناصر في جدول سمى الجدول الدورى للعناصر. على أن هذا الترتيب للعناصر طبقًا لخواصها الكيميائية المتشابهة أوجد عدداً من الفراغات في الجدول الدورى. وبدون معرفة، كاملة عن سبب هذا الترتيب للعناصر، فإن وجود طريقة للترتيب قادت مندلييف للتنبؤ بضرورة وجود عناصر لم تكتشف بعد حتى يكتمل الجدول كما أمكنه التنبؤ بخواص هذه العناصر وأوزانها الذرية. وقد صدقت نبوءة مندلييف؛ حيث تم اكتشاف عدد من العناصر الجديدة بعد ذلك.

حينما استطاع الفيزيائيون تفتيت الذرة والكشف عما بداخلها وجدوا أنها تتكون من ثلاثة أنواع من الجسيمات: الإلكترونات، البروتونات و النيوترونات. وقد استطاع نيلز بور من خلال فيزياء الكم تفسير الخواص الكيميائية للعناصر وتركيب الذرة من الداخل وربطها مع الجدول الدورى لمندلييف.

ظهر الجدول الدورى للعناصر في بحث نشـره مندلييف عام ١٨٦٩، أما تفسير بور المبنى على فيزياء الكم فقد جاء عام ١٩٢٠ أى بعد حوالى ستين عامًا. ولكن حينما بدأ تركيب الذرة يكشـف عن خواصـها وماهيتهـا، بدأ التساؤل عن ماهية مكونات الذرة وطبيعتها.

وكانت القوى الكهرومغناطيسية كافية بشكل كامل لشرح كيفية وجود الإلكترونات سالبة الشحنة داخل الذرة وحركتها، والتى تضم فى نواتها البروتونات كشحنات موجبة.

ولكن كيف يمكن لعدد من البروتونات وكلها موجبة الشحنة الارتباط بشدة داخل النواة بدون أن تتفرق متنافرة كنتيجة للقوى الكهربية؟. فى عام ١٩١٠ بين رادرفورد المولود عام ١٨٧١ أن الشحنة الموجبة للذرة تتركز فى نواتها الصغيرة جداً بالنسبة لحجم الذرة، كما أوضح فى العشرينيات من نفس القرن أنه لا بد من وجود جسيمات متعادلة أيضاً فى الذرة مماثلة للبروتونات، ولكنها غير مشحونة وقد أسماها نيوترونات.

كان وجود النيوترونات ضرورياً لتبرير سبب وجود عدد من الذرات متشابهة فى الخواص الكيميائية، ولكنها مختلفة قليلاً فى الوزن. التفسير هو أن الخواص الكيميائية تعتمد على عدد الإلكترونات، وبالتالى عدد البروتونات. وعلى هذا فتغير الوزن الذرى دون تغير الخواص الكيميائية يتطلب زيادة أو نقصان جسيمات متعادلة لا شحنة لها (نيوترونات). وتسمى الذرات المتشابهة فى الخواص الكيميائية والمختلفة فى الوزن بالنظائر (نظير العنصر)، وقد قام شادويك بالتأكيد على وجود النيوترونات من خلال سلسلة من التجارب عام ١٩٣٢، ونال على ذلك جائزة نوبل عام ١٩٣٥ .

هذه الفترة القصيرة بين اكتشاف شادويك للنيوترون، وحتى فوزه بجائزة نوبل تحدد الفترة التى كانت فيها فيزياء المكونات الذرية سهلة وبسيطة، وبدا أن الفيزيائيين مهتمون فقط بأربعة أنواع من الجسيمات. وقد ساعد وجود النيوترون على منح النواة ثباتًا أكثر؛ حيث يمكن للنيوترون حجب البروتونات من المواجهة المباشرة، على أن هذا لم يكن كافيًا أيضًا لشرح سبب ثبات النواة، وهكذا بدأت البساطة الواضحة فى التركيب الذرى فى الاختفاء شيئًا فشيئًا.

لقد أتت الصدمة الأولى من العالم اليابانى هيديكى يوكاوا. و يوكاوا المولود عام ١٩٠٧ المتوفى ١٩٨١ قد تعلم فى جامعة كيوتو فى أوساكا. وفى عام ١٩٣٥ - حيث كان يعمل فى بحث الدكتوراه (والتى منحها عام ١٩٣٨)، وقام بالتدريس فى جامعة أوساكا. ثم عاد إلى كيوتو كأستاذ فى الفيزياء - قد احتار أيضاً فى تفسير ماذا يربط نواة الذرة مثله مثل باقى العلماء فى ذلك الوقت. وقد قام يوكادا بفرض وجود قوة أخرى أقوى كثيراً جداً من قوة التنافر الكهربية هى المسئولة عن ربط البروتونات داخل النواة

على الرغم من قوة التنافر التى تعمل على بعثرة البروتونات. وحيث إننا لم نلاحظ فى حياتنا العادية أى وجود لقوة كبيرة تتغلب على القوة الكهربية، فإنه لابد أن هذه القوة تعمل فقط على المسافات الصغيرة جداً داخل النـواة وتضمحل خارجها وهى تقوم بربط البروتونات و النيوترونات داخل النواة، وفى الوقت نفسه تسمح أحيانًا لبعض المكونات (مثل جسيمات أشعة ألفا) لتنطلق خارجة من النواة طالما خرجت بعيداً عن منطقة تأثير هذه القوة. استعان يوكاوا بتشبيه هذه القوة الجديدة بالقوة الكهرومغناطيسية.

فى نظرية المجال الكهرومغناطيسى تنتج القوة من تبادل الجسيمات و الفوتونات الوقتية؛ حيث إنه يمكن اعتبار كتلة الفوتونات صفراً، فإنه بإعطاء الفوتونات طولاً موجيًا طويلاً جداً تكون طاقة الفوتون صغيرة جداً فى هـذه الحالة. وهكذا فـلا يوجد حد من الناحية النظرية للمدى الذى تؤثر فيه القوى الكهربية - إن فوتونًا وقتيًا مرتبطًا بالإلكترون يمكنه التأثير (ولو بقوة ضعيفة جدًا) على إلكترون آخر فى أى مكان فى الكون - ومع ذلك فإن التأثير يكون أقوى كلما كان الإلكترونان أقرب إلى بعضهما البعض.

ماذا لو كان للفوتونات كتلة؟ فى هذه الحالة يكون هناك قيمة دنيا لطاقة الفوتون الوقتى Δ ط. وتضع القيمة المحددة للطاقة حداً للفترة الزمنية لحياة الجسيم الوقتى طبقًا لمبدأ اللاحتمية لهايزنبرج. وحيث إنه لا يمكن لأى جسيم أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، فإن هذه الفترة الزمنية المحددة تضع حداً للحيز الذى يؤثر فيه هذا الفوتون ذو الكتلة؛ حيث إنه يجب أن يرجع للإلكترون المرتبط به، أو يتم تبادله مع إلكترون آخر قبل انقضاء فترة حياته. وهكذا فإنه فى عام ١٩٣٥ أوضح يوكاوا أنه لابد من وجود مجال آخر مشابه للمجال الكهرومغناطيسى مرتبط بالبروتونات والنيوترونات. هذا المجال يتم تجسيده بواسطة جسيمات من قبيلة البوزونات (مثل الفوتونات)، ولكنها على عكس الفوتونات لها كتلة، وهذه البوزونات يتم تبادلها مع الجسيمات التى تشعر بوجود المجال القوى (فى مقابل المجال الكهرومغناطيسى). وقد تبين كما يقول يوكاوا أن الإلكترونات لا تشعر بوجود هذا المجال القوى.

والمدهش فى فرض يوكاوا أنه يمكنك حساب كتلة هذا النوع الجديد من البوزونات. إن حيز تأثيره لا يتعدى حجم نواة الذرة، وإلا فلن يسمح لجسيمات ألفا بالهروب من النواة مما يؤدى إلى اختلاف تنبؤات النظرية عن المشاهدات العملية. وحيث إن قطر نواة الذرة فى المتوسط حوالى ١٠$^{-١٢}$سم كما أثبتت التجارب التى تلت تجارب فريق رازرفورد. من هذه المعلومات ومن مبدأ اللاحتمية قام يوكاوا بحساب كتلة الجسيمات المرتبطة بالمجال القوى لتكون حوالى ١٤٠م.أ.ف(*) مما يعنى أنها أثقل حوالى ٢٠٠ مرة من الإلكترونات وتبلغ ١: ٧ مرة من كتلة البروتون.

كيف يمكن وضع فروض يوكاوا موضع الاختبار؟ لم يكن لدى العلماء وسيلة للولوج داخل النواة للبحث عن هذا النوع الجديد من البوزونات. مع أن القوة الشديدة تعتمد على تبادل البوزونات الوقتية(٥)، فإن المعادلات لا تمنع وجود بوزونات دائمة إذا كانت هناك الطاقة اللازمة لذلك. لكن طبقًا للمعادلات، فإن هذه الجسيمات ليست مستقرة فكمية الطاقة المختزنة فيها يمكنها التحول إلى صورة أخرى من صور الطاقة. كما يمكن لهذه الجسيمات أن تظهر إلى الوجود بواسطة الطاقة المتوفرة من تصادم الجسيمات المادية السريعة جدًا. ويوجد اليوم عدد من المعجلات العملاقة مثل CERN فى جنيف، ويستخدمها العلماء فى إحداث تصادم بين شعاع من الإلكترونات والبروتونات السريعة مع بعضها البعض، أو توجيهها نحو هدف ثابت؛ حيث ينتج عن ذلك شلالات من الجسيمات الدقيقة التى توجد لفترة زمنية قصيرة. وتتولد هذه الجسيمات من طاقة الحركة الهائلة للجسيمات المتصادمة من خلال معادلة ط = ك ع^{٢}، وبالتالى الكتلة ك = ط /ع^{٢}.

(*) م.أ.ف هى ترجمة Mev ميجا إلكترون فولت، وهى وحدة طاقة تستخدم فى حساب كتلة الجسيمات الصغيرة من خلال معادلة أينشتاين ط = ك ع^{٢}. والمقصود أنها تساوى طاقة كتلة السكون. وتبلغ كتلة الإلكترون حوالى ٠,٥ ميجا إلكترون فولت، وكتلة البروتون حوالى ٨٠٠ ميجا إلكترون فولت (م أ ف).

(٥) لأن هذه البوزونات وقتية، وليست حقيقية، فإنها موجودة داخل النواة لتربط النيوترونات والبروتونات معًا، وذلك دون أن تؤثر على وزن النواة. ولكن حتى يمكن معالجة المجال الشديد كميًا، فإن مشاكل الكتلة اللانهائية التى صادفناها فى نظرية QED تظهر أيضًا فى هذا المجال الشديد، وبطبيعة الحال سوف نلجأ لإعادة التسوية كما فعلنا سابقًا. وإن كان هذا سوف يتطلب تكوين جسيمات أكثر بدائية من تلك التى نتحدث عنها الآن.

يجب التركيز على نقطة مهمة، وهى أن الجسيمات الجديدة المتولدة من التصادم ليست شظايا متناثرة من الجسيمات الداخلة فى التصادم نتيجة لتكسيرها فى التصادم، ولكنها جسيمات جديدة صُنعت للتو من الطاقة المتوفرة. وعلى هذا فالتصادم يمكنه أن ينتج جسيمات لها كتلة سكون أكبر من الجسيمات الداخلة فى التصادم، وذلك بافتراض أن طاقة الحركة عالية جداً وأكبر من تلك التى تتطلبها كتلة السكون هذه(٦).

فى سنة ١٩٣٠ كان المصدر الوحيد للجسيمات عالية الطاقة هو الكون؛ حيث تصطدم هذه الجسيمات الآتية من الكون بالهواء الجوى، وتعرف هذه الجسيمات عالية الطاقة الآن بالأشعة الكونية، فشعاع من الأشعة الكونية يصطدم بجسيم آخر فى طبقات الجو العليا يمكنه صنع أجسام جديدة، ومنها بوزونات القوة الشديدة. راقب الفيزيائيون العاملون فى مجال الطاقة العالية الأشعة الكونية من خلال تسجيل مسارها على الألواح الفوتوغرافية أول الأمر، ثم من خلال تطوير أجهزة مثل عدادات جيجر حتى تشعر بمرور هذه الجسيمات وتسجلها، بالإضافة إلى طرق أخرى لمراقبة وتسجيل هذه الجسيمات. وما أن يمكنك تسجيل مسار الأشعة الكونية وتصويرها يمكنك حينئذ معرفة ما إذا كانت تحمل شحنة كهربية من خلال انحرافها فى مجال مغناطيسى، كما يمكنك استنتاج كمية حركتها، وبالتالى كتلتها، وذلك من خلال قياس مدى انحرافها عن المسار الأصلى عند مرورها فى مجالات مغناطيسية.

يعتبر كارل أندرسون أحد رواد فيزياء الطاقة العالية، وقد قام عام ١٩٣٦ بدراسة مسارات الأشعة الكونية بواسطة أجهزة التتبع على سطح الأرض؛ حيث وجد آثاراً لجسيم أثقل من الإلكترون، ولكنه أخف من البروتون. وبدا أول الأمر أن الجسيم الذى

(٦) لم أكن مستريحا فى البداية لاستخدام هذه الصياغة التى لا تأخذ فى الاعتبار أن الجسيمات هى كمات للمجال. ولكن الجسيمات والمجال هى مجرد ألقاب نستخدمها للتوضيح. وعندما تناقشت مع العالم المتخصص فى فيزياء الجسيمات فرانك كلوز عن أنسب الطرق لاستخدام هذه الألقاب قال لى إنه أمر غير مهم. فعندما يدرس تجربة جسيمات كتلك التى تجرى فى CERN ويحاول فهم ما يجرى فهو يبحث عن انتقال كمية الحركة خلال التفاعلات. وهذا هو ما يهم، فكل من الجسيمات وكمات المجال لها كمية حركة وعندما تعرف أين تذهب كمية الحركة، فإن الاسم لا يهم عندئذ.

تنبأ به يوكاوا قد اكتشف والذى يحمل القوة الشديدة. وقد سمى هذا الجسيم "ميوميزون" أو (ميون). وقد أوضحت الدراسات بعد ذلك أنه ليس حامل القوة الشديدة؛ حيث إن كتلته مختلفة عما يجب أن يكون، كما أنه ليس لديه الرغبة فى التفاعل والتأثير على مكونات النواة. ولكن فى عام ١٩٤٧ وجد العالم الإنجليزى سيسيل بويل بوزونًا ذا فترة حياة قصيرة، وله الخواص المطلوبة، ومنها كتلة قريبة جدًا من حسابات يوكاوا كما أن له تأثيرًا واضحًا على مكونات النواة. وقد سمى "بى ميزون" أو "بيون" وقد اتضح أن الميون هو أحد نواتج تحول البيون، وبهذا الاكتشاف الذى يؤكد صدق نظرية يوكاوا فقد استحق يوكاوا جائزة نوبل فى الفيزياء عام ١٩٤٩ ليكون بذلك أول يابانى يحصل على هذه الجائزة، كما أن بويل حصل عليها هو أيضًا عام ١٩٥٠ . أما أندرسون فقد نالها قبل ذلك عام ١٩٣٦ فى ذات العام الذى اكتشف فيه الميون. وذلك عن اكتشاف آخر تمامًا لم ينتج عنه ليس فقط إضافة عضو جديد إلى غابة الجسيمات الدقيقة، ولكن نتج عنه مضاعفة عددها فى ليلة وضحاها.

بول ديراك عالم إنجليزى ولد عام ١٩٠٢ ويعتبر أحد المساهمين الرئيسيين فى تطوير فيزياء الكم فى العشرينيات. وقد قام بدمج المحاولات الأولى لفيزياء الكم، والتى قدمها فيرنر هايزنبرج مع نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين مقدما بذلك لفكرة اللف الكمى كإحدى خصائص الإلكترونات، وسرعان ما انتقلت هذه الفكرة إلى جسيمات أخرى. كما قام بصياغة رياضية متكاملة لنظرية الكم، كما كتب أحد أهم الكتب المدرسية فى هذا الموضوع وما زال يرجع إليه الطلاب والباحثون حتى الآن. وقد أسهم فى تطوير QED ومع ذلك فقد أوضح فى نهاية حياته ١٩٨٤ عدم سعادته بفكرة إعادة التسوية renormalization والتى لا تعدو فى رأيه أن تكون ورقة يتم بها تغطية الشروخ فى النظرية. ولهذا فخارج الدائرة الضيقة لعلماء الفيزياء يعتبر أهم إنجازات ديراك هو تنبؤه عام ١٩٢٨ بأن جسيمات العالم المادى لكل منها نظير مضاد للمادة (ضد - المادة) كما لو كانت صورة معكوسة للجسيم المادى.

والمفارقة أن هذا العالم العظيم فى الفيزياء النظرية، والذى يمتاز بالدقة والتنظيم، فإن تنبؤه بضد المادة قد جاء بالمصادفة، وقام بتقديمه للعالم بطريقة غير دقيقة.

اكتشف ديراك أن المعادلات التى يقوم بكتابتها للإلكترونات لها فى الواقع مجموعتان من الحلول وليس حلاً واحداً. ويعرف هذه الخاصية كل من درس المعادلات الجبرية البسيطة من الدرجة الثانية، وهى التى تتضمن مربع كمية غير معلومة. المربعات دائماً موجبة فإذا ما ضربت ٢× ٢ تحصل على ٤، وكذلك إذا ما ضربت -٢ × -٢ تحصل على ٤ أيضاً إذن إجابة السؤال "ما هو الجذر التربيعى للرقم ٤؟" هو إما +٢ أو -٢ وكلتا الإجابتين صحيحتان. بالطبع معادلات ديراك فى ميكانيكا الكم أعقد من ذلك، ولكن المضمون فى النهاية واحد. هناك إذن مجموعتان من الحلول إحداهما تصف الإلكترون (والذى يحمل شحنة سالبة) والأخرى يصف جسيماً آخر غير معلوم يحمل شحنة موجبة.

كان العلماء عام ١٩٢٨ يعلمون بوجود الإلكترون والبروتون، وما زالوا متشككين فى وجود النيوترون، ولذلك كانت فكرة ديراك الأولى أن الجسيم الناتج من حل معادلاته ذا الشحنة الموجبة يمكن أن يكون البروتون. هذا المثال يبين لنا كيف أن عالماً كبيراً مثل ديراك كان يتحسس طريقه فى الظلام فى الثلاثينيات من القرن الماضى. فلم يجد سبباً يدعوه للاعتقاد بأن الجسيم ذا الشحنة السالبة، وذلك ذا الشحنة الموجبة فى معادلاته يجب أن يكون لهما نفس الكتلة. نستطيع الآن فقط بالمعلومات المتوافرة أن نؤكد أن البروتون ثقيل جداً على أن يكون هو الجسيم الآخر نظير الإلكترون فى المعادلات. فى البداية لم يأخذ أى من علماء الفيزياء اقتراح ديراك على مأخذ الجد كما لم يكن هناك من سبيل للحصول على الجسيم الافتراضى بعكس ما قد يحدث الآن عند معالجة هذه الأفكار. وعلى هذا فقد نحى الفيزيائيون جانباً فكرة أن حسابات ديراك لها أى معنى حقيقى، وتم إهمال الحل الآخر تماماً كما يقوم المهندسون الآن عند حلهم معادلات الدرجة الثانية من أخذ أحد الحلول يناظر واقعاً ملموسا، وإهمال الحل الآخر وذلك عند بناء الكبارى أو غيرها.

كان أندرسون يدرس الأشعة الكونية عام ١٩٣٢ فى غرفة السحاب، وهى جهاز عندما تمر به جسيمات الأشعة الكونية ترسم أثراً واضحاً يمكن دراسته، وهو يماثل الأثر الذى تتركه الطائرات النفاثة فى أعالى الجو نتيجة تكثيف البخار. يقوم الباحثون

بتصوير هذه الآثار فى غرفة السحاب حتى يمكن دراستها بعد ذلك لاحقًا. أحد الأشياء التى قام بها أندرسون هو دراسة كيفية تغيير هذه المسارات بتأثير المجالات المغناطيسية؛ حيث وجد بعض المسارات تنحنى بنفس المقدار كالإلكترونات، ولكن عكس اتجاهها(٧). وهذا يعنى أن هذه الجسيمات لها ذات قيمة كتلة الإلكترون، ولكن تخالفها فى الشحنة الكهربية (موجبة)، وقد سميت هذه الجسيمات (ضد - الإلكترون)، والاسم الشائع الآن هو بوزيترون. وقد أمكن تمييز هذه الجسيمات على أنها الجسيمات التى تنبأت بها معادلات ديراك. وكان هذا هو الاكتشاف الذى استحق عليه أندرسون جائزة نوبل، بينما نال ديراك الجائزة مناصفة مع شرودنجر عام ١٩٣٣ .

اكتشف البوزيترون فى نفس العام الذى اكتشف فيه النيوترون (١٩٣٢)، ولكن الآثار التى تنم عن البوزيترون كانت موجودة من قبل، ولكن أسئ تفسيرها على أنها إلكترونات ولكن تسير فى الاتجاه المعاكس. إن امتداد حسابات ديراك لتشمل كل الجسيمات النووية أوضح للفيزيائيين أن هناك ٦ جسيمات بالإضافة إلى الفوتونات الإلكترون البوزيترون، البروتون وضد - البروتون وهو ذو شحنة سالبة بالطبع، ثم النيوترون وضد-النيوترون وهو متعادل كهربيًا(٨).

وتقضى قوانين الفيزياء بأنه إذا ما التقى جسيم بضده، فإنهما يتلاشيان ويتحولان إلى كم من الطاقة (فوتونات أشعة جاما). فالإلكترون و البوزيترون يلاشيان بعضهما من العالم المادى، وبنفس الطريقة يمكن عكس المعادلات، وبالتالى فإن فوتونات أشعة

---

(٧) الآثار الناجمة عن إلكترون متحرك فى اتجاه عقارب الساعة تماثل تمامًا الآثار الناجمة عن بوزيترون متحرك فى عكس اتجاه عقارب الساعة. صعوبة اكتشاف أندرسون تكمن أساسًا فى تحديد أى اتجاه تسير فيه الجسيمات عند دخولها غرفة السحاب، وهذا يفسر السبب الذى استحق من أجله جائزة نوبل، إنه من السهل لى القول "قام أندرسون بقياس درجة انحناء مسار الجسيم ووجد البوزيترون" ولكن هذا العمل ينضوى على صعوبة تقنية بالغة.

(٨) بالرغم من أن النيوترون ليست له شحنة كهربية وبالتالى فمضاد النيوترون ليست له شحنة أيضًا، فقد أمكن تمييزهما مثل بقية الجسيمات، حسابات ديراك تنطبق تمامًا عليها مثلما تنطبق على البقية أما الفوتون فإنه يعتبر ضد نفسه وسوف نعود لذلك لاحقًا.

جاما يمكنها التحول إلى إلكترون و بوزيترون إذا كانت طاقة الفوتون تكفى. كما يمكن إنتاج أى ثنائى جسيم ومضاد الجسيم بطبيعة الحال. ولكن مع ملاحظة أن الثنائى هو جسيم مع نظيره المضاد له تماماً، وليس بروتوناً مع مضاد النيوترون. كل هذه التنبؤات قد ظهرت فى التجارب على الرغم من أن مضاد البروتون ومضاد النيوترون لم يكتشفا حتى الخمسينيات من القرن العشرين، وهذه العلاقة المنعكسة بين المادة والطاقة تتبع دائماً قانون الطاقة ط = ك ع٢ وجميع قوانين فيزياء الكم الأخرى.

إذن اكتشف البوزيترون و النيوترون عام ١٩٣٢ . واكتشف الميون عام ١٩٣٦ واكتشف البيون عام ١٩٤٦ . وهكذا اتضح أن الجسيمات تأتى فى مجموعتين المجموعة الأولى تشعر بوجود القوة الشديدة (البروتونات و النيوترونات و البيونات التى تحمل هذه القوة)، والمجموعة الأخرى لا تشعر بها (الإلكترون والميون)، وهكذا أمكن تقسيم جسيمات مادة وجسيمات حاملة للقوة. أما الأشياء التى تشعر بالقوة الشديدة. فتسمى هادرونات (hadrons) بينما تلك التى لا تشعر بها تسمى لبتونات (Leptons) وكل اللبتونات هى من قبيلة الفيرميونات، ولها عزم لف مقداره نصف العدد الصحيح. ولم نلتق حتى الآن من فصيلة اللبتونات غير الإلكترونات والميونات، والميون مشابه للإلكترون، ولكن أكثر منه كتلة، ومن الهادرونات ما هو فيرميونات (أى أنها مادة) وتسمى باريونات مثل البروتون و النيوترون. أما البوزونات فهى حاملة القوة بين الجسيمات وتسمى تحديداً ميزونات، وبالتالى فالبيون ميزون ويأتى فى ثلاثة تنويعات. هناك بيونات متعادلة الشحنة الكهربية، فعندما يتبادل بروتون و نيوترون بيوناً متعادلاً، فإنهما يتماسكان، ولكنهما لا يتغيران. كما يتبادل البروتونات بينها وبين بعضها بعض البيونات المتعادلة، وكذلك تتبادلها النيوترونات، ويؤدى هذا إلى تماسكها. وهناك نوعان من البيونات المشحونة سواء شحنة سالبة أو موجبة وهما جسيمان متضادان(٩).

---

(٩) مضاد المادة المناظر للبيون المتعادل يبدو أنه لا يمكن التفرقة بينه وبين البيون من خلال أى مشاهد فيزيائية، وبالتالى فالبيون المتعادل هو مضاد نفسه. وهذا ينطبق أيضاً على الفوتون فعلى الرغم من أنه يمكنك كتابة المعادلات التى تصف مضاد الفوتون، فإنه عمليا الفوتون ومضاد الفوتون هما شىء واحد.

إذا تبادل بروتون بيونًا موجبًا تحول إلى نيوترون. كما يمكن أن يتبادل نيوترون بيونًا سالبًا فيتحول إلى بروتون. وكل هذه التبادلات تعمل على ربط البروتونات و النيوترونات معًا. هكذا فإن عدد الجسيمات المطلوبة لشرح الذرة فى تزايد، لكن يبقى هناك جسيم واحد ومجال واحد يجب إضافتهما.

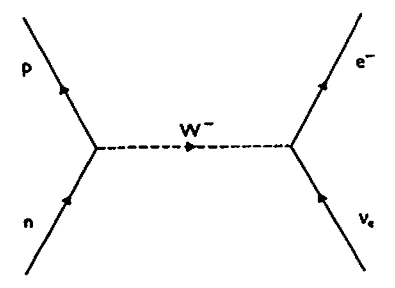
دعنا نرجع إلى نهاية القرن التاسع عشر. راذرفورد الذى عمل أولاً فى كامبريدج ثم انتقل إلى كندا وجد أن اليورانيوم يطلق نوعين من الإشعاعات، وقام بدراسة خواصهما (ثم اكتشف نوع ثالث بعد ذلك أطلق عليه أشعة جاما وهى فوتونات عالية الطاقة). أحد هذه الإشعاعات هو جسيمات ألفا، وقد وجد بعد ذلك أنها أنوية الهليوم، وتتكون من بروتونات و نيوترونات مرتبطين بعضهم ببعض فى تكوين مستقر جداً، والآخر هو ما سمى إشعاع بيتا وهو إلكترونات. وبالتالى فإن الذرة يمكنها أن تشع إلكترونات، ولكنها لم تأت من سحابة الإلكترونات حول النواة، لقد أتت هذه الإلكترونات من النواة ذاتها هكذا أمكن لراذرفورد وزميله فردريك سودى التأكد من هذه الحقيقة فى بداية القرن العشرين. تبين بعد ذلك أن النيوترون فى النواة يمكنه التحول إلى بروتون، وينطلق إلكترون من هذا التحول، وبذلك تتحول الذرة من عنصر إلى عنصر آخر (أعلى درجة فى الجدول الدورى للعناصر). واقع الحال يؤكد أن هذا يحدث فقط فى بعض الأنوية غير المستقرة التى غالبًا ما تكون النيوترونات فى أغلب الذرات مستقرة وسعيدة بوضعها ولا ترغب فى التحول. ولكن إذا وجد نيوترون منعزلاً بعيداً عن النواة، فإنه يتحول فى غضون دقائق معدودة إلى بروتون وإلكترون ويسمى هذا انحلال بيتا، ويجب أن يشمل هذا التفاعل قوة أخرى وجسيم آخر بالإضافة لما ذكر من قبل.

تاريخيا كان قد توصل أحد الفيزيائيين إلى هذا الجسيم الجديد أولاً. كان انحلال بيتا موضوعًا رئيسيًا لأبحاث الفيزيائيين خلال العقد الأول من القرن العشرين. ومن بين نتائج الملاحظات المثيرة للدهشة؛ وجد الفيزيائيون أن الإلكترونات المنطلقة من انحلال بيتا يمكنها الحركة بقيم مختلفة جداً من الطاقة. إن كتلة البروتون والإلكترون الناجمين عن انحلال النيوترون تقل عن كتلة النيوترون بمقدار ١,٥ مرة

كتلة الإلكترون(١٠). وهذا الفرق فى الطاقة متاح لكل من البروتون والإلكترون على هيئة طاقة حركة. عندما يظل البروتون داخل النواة فبطبيعة الحال تؤول غالبية طاقة الحركة إلى الإلكترون بالإضافة إلى كتلة السكون. وهكذا فكل إلكترون ناتج عن نشاط إشعاعى فى الذرة يجب أن يخرج من النواة بكمية محددة من الطاقة. ولكن التجارب أوضحت أن طاقة حركة الإلكترونات أقل من تلك الكمية المحسوبة، وأحيانًا أقل بكثير. فأين ذهبت الطاقة؟.

ولفجانج باولى فيزيائى ولد فى النمسا عام ١٩٠٠ جاء بالإجابة عام ١٩٣٠ . يتعين وجود جسيم آخر ينطلق فى انحلال بيتا ويحمل فرق الطاقة بدون أن نتبينه. وهذا الجسيم لا شحنة له ولا كتلة له مما أمكنه التخفى عن الفيزيائيين التجريبيين.

لم يلق هذا الفرض ترحيبًا أول الأمر بين الفيزيائيين لبساطته الشديدة كما أنه يعنى أنه كلما ظهرت مشكلة فى تجارب الجسيمات الأولية، فإن الحل الأبسط هو افتراض جسيم جديد. ولكن باولى أصر على رأيه، وقام بإقناع الفيزيائيين حتى حصل على دعم العالم الإيطالى المولد إنريكو فيرمى. قام فيرمى بتطوير فكرة باولى بافتراض قوة جديدة فى المعادلات وهى تسمى بالقوة النووية الضعيفة.



شكل ٢-٤ جميع التفاعلات الأساسية يمكن تمثيلها بواسطة مخطط فينمان.
فى هذه الحالة المخطط يمثل انحلال بيتا على مستوى النيوترون والبروتون.

---

(١٠) يجدر الإشارة إلى أنه لا يمكن اعتبار أن الإلكترون يوجد داخل النيوترون بحيث يمكن اعتبار أن النيوترون هو مركب من البروتون والإلكترون تربطهما القوة الكهرومغناطيسية. مبدأ اللاحتمية لا يسمح للإلكترون بالوجود داخل النواة، وبالتالى فلا يمكن بالوجود داخل النيوترون. حتى يمكن تحويل النيوترون إلى بروتون وإلكترون يجب الاستعانة بمعادلة الطاقة والكتلة لنظرية النسبية. والتى تسمح للكتلة أن تتحول إلى طاقة ثم إلى كتلة من نوع آخر. ولهذا فكل إلكترون يخرج مع أشعة بيتا هو إلكترون خرج إلى الوجود حديثًا.

نظرية المجال تتطلب نوعًا جديداً من القوة على أية حال لتفسير إشعاع بيتا؛ لأن القوة الشديدة لا تشعر بها الإلكترونات كما أنه لا يمكن أن تكون القوة الداخلة هى القوة الكهرومغناطيسية أو قوة الجاذبية. وقد استخدم فيرمى نموذجًا رياضيًا قريبًا من QED وخرج بافتراض أنه عند تحول نيوترون إلى بروتون، فإنه يتم انبعاث جسيم هو حامل للمجال الجديد وهو بوزون مشحون شحنة سالبة ويرمز له W^-، ويسمى الآن (بوزون متجهى وسيط)، يحمل الشحنة السالبة والطاقة بينما النيوترون يتحول إلى بروتون ويرتد. ولكن هذا البوزون ثقيل جداً (لم تخبرنا الحسابات الأولية بدقة بكتلته)(١١) وهذا الجسيم يحمل طاقة عالية جداً ليس فقط لتكوين الإلكترون، ولكنها طاقة وقتية كبيرة جداً مستعارة من الفراغ مما يجعل الجسيم غير مستقر ويوجد لفترة قصيرة جداً. ولا تتاح له الفرصة ليتفاعل مع أى جسيم آخر، ولكن سريعًا ما يفقد هذه الطاقة ويتحول إلى إلكترون وجسيم جديد بنفس الطريقة التى يتحول بها الفوتون إلى إلكترون و بوزيترون. وحيث إن الإلكترون ينتمى إلى فصيلة اللبتونات، فإنه حتى يظل عدد اللبتونات ثابتا فى الكون، فإن الجسيم الجديد يجب أن يكون مضاداً للبتونات (حيث إننا بدأنا بجسيم من الباريونات وهو النيوترون وانتهينا بأحد الباريونات وهو البروتون، فإن عدد الباريونات ثابت) أطلق فيرمى على الجسيم الجديد اسم نيوترينو بمعنى جسيم صغير جداً ومتعادل، والآن يطلق عليه إلكترونيوترينو.

رفضت مجلة نيتشر الإنجليزية نشر مقال فيرمى عام ١٩٣٣ حول هذه الآراء بدعوى أنها خيالية، ولكن بحوث فيرمى سرعان ما نشرت بالإيطالية، ثم الإنجليزية، وقد تم العثور على دلائل وجود النيوترينو عام ١٩٥٣ فى تجارب تنتج شلالات من النيوترينو من المفاعلات النووية. وكانت له كافة الخصائص التى تنبأت بها النظرية فيما عدا أنه توجد بعض الافتراضات الآن من أن النيوترينو له كتلة صغيرة جداً أصغر من الإلكترون.

---

(١١) نموذج فيرمى الأول تناول كل التفاعلات على أنها تحدث فى نقطة؛ مما يعنى أن جسيم W^- له حيز عمل صفر، وبالتالى كتلته لا نهائية. ولكن تم بعد ذلك تطوير فكرة أن الجسيم الحامل للقوة النووية الضعيفة له كتلة محددة عام ١٩٣٨ بواسطة العالم السويدى أوسكار كلاين.

وهكذا مع بداية الخمسينيات من القرن العشرين امتلكت الفيزياء عددًا كبيرًا من الجسيمات والمجالات لوصف تركيب الذرة. المجال الضعيف والتفاعلات المصاحبة له، تعتبر مهمة جدًا في عمليات انشطار واندماج الذرات، وتصنيع العناصر في النجوم والطاقة المتولدة في الشمس، وكذلك القنابل الذرية. وبقيت الكهرومغناطيسية محتفظة بمجالها بينما رفضت الجاذبية بعناد شديد جدًا الانصياع لنظرية المجالات الكمية. لا تقبل كل المجالات حيلة إعادة التسوية، وجميع المحاولات للتعامل مع مشكلة اللانهاية، والتي أمكن ترويضها في نظرية QED[١٢] فشلت مع الجاذبية فقط اثنان من اللبتونات ومضاداتهما كانا معروفين، الإلكترون والميون، وكل منهما له النيوترينو المناظر له. وهكذا فقد حصلت الجسيمات التي تشعر بالقوة الشديدة على اهتمام مركز، ولكن على مدى عقد من الزمان كلما غاص الفيزيائيون في ماهية الهادرونات، كلما أصبحت الصورة التي يحصلون عليها أكثر تشويشًا.

مع عام ١٩٣٢ كان يبدو أن العالم المادي يمكن وصفه من خلال ثلاثة جسيمات، وفي عام ١٩٤٧ كان هناك نصف دستة (بالإضافة إلى مضاداتهم). ومع نهاية عام ١٩٥١ كان هناك على الأقل خمسة عشر جسيمًا أساسيًا، وكانت القائمة مرشحة للزيادة. يوجد اليوم عدد من الجسيمات أكثر من عدد العناصر المعروفة في الجدول الدوري. وقد شهد عقد الخمسينيات اكتشاف أنواع جديدة من الهادرونات، ففي كل مرة يتم تشغيل أحد معجلات الجسيمات، كان يتم إنتاج نوع أو أكثر من الجسيمات مما يطيل من قائمة الجسيمات، وتنشأ هذه الجسيمات من الطاقة المجردة. وتأتي الطاقة من الماكينات الأكبر فالأكبر؛ حيث تقوم هذه الماكينات بإكساب الإلكترونات والبروتونات طاقات أكبر من خلال المجال الكهرومغناطيسي، ثم يتم إحداث تصادم بينها أو تصادمها مع هدف ثابت أي نواة؛ ذرة حيث إن الجسيمات المعجلة تنفذ من سحابة الإلكترونات كما لو أن قذيفة مدفع ٦ بوصات تمر من خلال ضباب البحر. لا يمكن إكساب أي جسم مادي سرعة تعادل أو تفوق سرعة الضوء، وهكذا مع استخدام طاقة أكبر،

(١٢) أو كما قد يقول ديراك إن مشكلة اللانهاية تم إخفاؤها تحت البساط.

فإن الجسيمات لا تسير أسرع فعندما تقترب سرعتها من كسور الضوء، فإن كتلة الجسيمات تزيد بطريقة محسوسة. وعندما تتصادم هذه الجسيمات المعجلة، فإن هذه الكتلة الإضافية تنتج جسيمات جديدة (فى الغالب ذات فترة حياة قصيرة)، وتظهر آثار هذه الجسيمات على هيئة مسارات فى غرفة السحاب أو الفقاعات أو غيرها من الأجهزة. وفى كل الأحوال، فإن كل جسيم ينتج بهذه الطريقة يكون مصحوبا بمضاد الجسيم المناظر له، كما أن عدد اللبتونات وعدد الباريونات يكون دائمًا ثابتًا، بينما الميزونات يمكن صناعتها فى أى وقت. ويجب أن نركز مرة أخرى على أنه لا يمكننا اعتبار هذه الجسيمات الجديدة موجودة داخل البروتونات أو الجسيمات الداخلة فى التصادم. هذه الجسيمات يتم إنتاجها من الطاقة التى يتم إعطاؤها للماكينات التى تقوم بالتعجيل. ويتم تمييز خواص هذه الجسيمات الجديدة وإعطاؤها أسماء وتحديد الفصائل التى تنتمى إليها، كما تم إعطاء أسماء تخيلية لخواصها مثل "خاصية الغرابة". كان علماء فيزياء الجسيمات الدقيقة فى حالة مماثلة لعلماء الكيمياء قبل اكتشاف مندلييف للجدول الدورى للعناصر، عندما كان يتم اكتشاف العناصر ومقارنتها مع بعضها البعض دون أدنى معرفة عن سبب هذه الخواص أو العلاقات بين العناصر وبعضها. وكانت الخطوة المهمة فى الكيمياء هى اكتشاف الجدول الدورى وتفسير الترتيب الدورى طبقًا للتركيب الذرى للعناصر. بالمثل كانت الخطوة المهمة لفيزياء الجسيمات الدقيقة فى أوائل الستينيات من القرن العشرين هى تصنيف الجسيمات فى جدول دورى أيضًا، ثم بعد ذلك بعدة سنوات عندما تم تفسير هذا الترتيب الدورى من خلال تركيب الهادرونات نفسها.

نموذج الطريق الثمانى: النظام بعد الفوضى

مع نهاية الخمسينيات من القرن العشرين لم تحرز نظريات المجالات أى تقدم نحو فهم العدد الهائل من الهادرونات المكتشفة. كانت هناك مشكلات مع اللانهاية مثل تلك التى قمنا بإعادة تسويتها فى QED، كما كان هناك صعوبة فى ضرورة إيجاد مجال ما لكل جسيم، وتزايد هذا الزخم عندما زاد عدد الجسيمات إلى عشرات ثم تعدى المئة.

أغلب علماء الفيزياء النظرية ابتعدوا عن نظرية المجالات فى أوائل الستينيات من القرن العشرين محاولين سلك طرق أخرى لفهم مسألة القوة الشديدة. ولن أخوض فى هذه المحاولات هنا؛ حيث إنه بحلول السبعينيات انتصرت نظرية المجال مرة ثانية. ولكن على الرغم من الاندفاع الهائل لمحاولة إيجاد نماذج بين خواص الهادرونات، والتى اتبعت أفكار الخمسينيات المرتبطة بنظرية المجال، فإن الجدول الدورى للجسيمات القائم على خصائص ثابتة ومحددة للتقسيم مثل جدول مندلييف الدورى كان بداية الخطوة التالية لتطوير فيزياء الجسيمات.

توصل اثنان من العلماء إلى الجدول الدورى للجسيمات بطريقة منفصلة كل منها عن الآخر. الأول هو الفيزيائى الأمريكى موراى جيل - مان المولود فى ١٩٢٩، والثانى الإسرائيلى يوفان نيمان المولود فى ١٩٢٥ . تعثر مسار نيمان العلمى نتيجة للحروب فى الشرق الأوسط، والتى تلت الحرب العالمية الثانية حيث ظهرت إسرائيل(*) إلى الوجود كدولة على الأرض التى كانت قبل ذلك فلسطين. فقد ظل نيمان فى الجيش الإسرائيلى بعد هذه الفترة المضطربة، ولكن وجد فرص لمتابعة الدراسة فى الوقت نفسه. ومع أن دراسته الأساسية كانت فى الهندسة، فإنه اتجه لدراسة الفيزياء الأساسية فى الخمسينيات حينما كان يعمل كملحق عسكرى فى السفارة الإسرائيلية فى لندن وحصل على الدكتوراه عام ١٩٦٢ من جامعة لندن. أما مسار جيل - مان فقد كان تقليديًا من جامعة يل إلى معهد ماساشوستس التكنولوجى، حيث حصل على الدكتوراه عام ١٩٥١ ثم إلى برينستون جامعة شيكاجو حيث عمل مع إنريكو فيرمى وعام ١٩٥٥ إلى معهد كاليفورنيا التكنولوجى Caltech. كان جيل - مان هو من أدخل فكرة "الغرابة" كخاصية مميزة للجسيمات، ويمكن قياسها، وهى فكرة أدخلت إلى فيزياء الجسيمات لمعالجة عدد من الظواهر التى تم ملاحظتها فى فيزياء الجسيمات الأولية أوائل الخمسينيات.

(*) ساعدت إنجلترا العصابات الصهيونية على الاستيلاء على أراضى الفلسطينيين و محاربة العرب وفرض الدولة بالقوة.

"الغرابة" هى خاصية يبدو أن الجسيمات الأولية تتمتع بها (أو بمعنى آخر هى خاصية يجب علينا أن نضيفها إلى النماذج التى نضعها حتى نستطيع فهم عالم الجسيمات الدقيقة). هذه الخاصية ليست أكثر أو أقل غموضًا من الشحنة الكهربية. بعض الجسيمات تحمل شحنة، وبعضها لا يحمل وتأتى الشحنة بنكهتين مختلفتين نسميهما موجبة و سالبة. و إذا أردنا الدقة فهناك إذن ثلاثة اختيارات: شحنة موجبة +١، وشحنة سالبة -١ وشحنة صفر، الغرابة أيضًا تختلف من جسيم إلى آخر، وهناك عدد من الاختيارات أكثر من الشحنة الكهربية، ولكن الجوهر واحد، الغرابة يمكن أن تكون -١ صفر، +١، +٢ أو أكثر. ويجب المحافظة على قيمة الغرابة أثناء التفاعلات. ندرك أن النيوترون يمكن أن يتحول إلى بروتون مع إطلاق إلكترون حتى يتم المحافظة على الشحنة الكهربية، وكذلك مضاد النيوترينو للمحافظة على عدد اللبتونات. كذلك يجب المحافظة على الغرابة حتى تكون متوازنة قبل وبعد التفاعل، وذلك عن طريق إنتاج عدد من الجسيمات لها العدد اللازم من شحنة "الغرابة" أثناء التفاعل الشديد. وهذا يجعل عدد التفاعلات المسموح به محدودًا، متمشيًا مع النتائج الغريبة التى حصل عليها العلماء فى الخمسينيات من القرن العشرين، ومن هنا جاء تسمية الغرابة. باستخدام قواعد شبيهة استطاع كل من جيل - مان و نيمان تصنيف وتجميع الجسيمات الأولية الجديدة والقديمة فى نماذج طبقًا لقيم الشحنة، اللف والغرابة بالإضافة إلى خواص أخرى. وسمى جيل_مان هذا التصنيف النموذج الثمانى أو الطريق الثمانى، وذلك فى إشارة واعية إلى "ثمانى فصائل" فى الفلسفة البوذية؛ لأن عددًا من النماذج التى توصل إليها كانت تشمل بدايةً مجموعات من ثمانية جسيمات أولية فى الحقيقة، فالترتيب يشمل فصائل تضم ١، ٨، ١٠ أو ٢٧ عضوا؛ حيث كل عضو يمثل تنويعة، فى بعض الخصائص. تم إعلان الترتيب عام ١٩٦١ وفى عام ١٩٦٤ اشترك كل من جيل - مان ونيمان فى إصدار كتاب "الطريق الثمانى"[١٣]؛ حيث أعادا فيه نشر بحوثهما الأصلية، بالإضافة إلى مساهمات أخرى لتعميق فهم غابة الجسيمات الدقيقة.

(١٣) Benjamin ,The Eight fold way. New York

ومنذ ذلك الحين قام التصنيف المقترح بالتنبؤ بوجود جسيمات أخرى، مثلما حدث مع الجدول الدورى للعناصر لمندلييف حتى قبل ظهور فيزياء الكم.

اتسع الطريق الثمانى ليحتوى فصيلة من الباريونات من عشرة أعضاء، وبها فجوة. وكان هناك حاجة إلى جسيم جديد لملء هذه الفجوة، وقد أطلق جيل - مان اسم أوميجا سالب (Ω^-) على هذا الجسيم متمشيًا مع آخر حرف فى الحروف اليونانية، وهذا الجسيم يجب أن يكون له شحنة سالبة وقيمة غرابة تساوى -٣ وكتلة ١٦٨٠ م أ ف. وقد تم اكتشاف هذا الجسيم عام ١٩٦٣ بواسطة باحثين من معمل بروكهافن فى نيويورك وكذلك CERN فى جنيف. لقد تطلب الأمر ستين عامًا حتى يكتمل الجدول الدورى لمندلييف كتفسير متكامل للعناصر معتمدًا على تركيب الذرة، وتطلب الأمر أكثر من عشر سنوات حتى يكتمل "الطريق الثمانى" كتفسير متكامل للهادرونات، وكان السبب فى الانتظار كل هذه الفترة أن الكثير من الفيزيائيين لم يكونوا مستعدين لقبول الفكرة التى أعلنها جيل - مان وجورج تسفايج عام ١٩٦٤، ومؤداها أن بعض الجسيمات الأولية مثل البروتونات و النيوترونات مكونة من جسيمات أخرى أساسية "تسمى كوارك"(*) وتجتمع هذه الكوارك فى مجموعات ثلاثية، ولها شحنة كهربية أقل من شحنة الإلكترون.

الكوارك

إذا نظرنا إلى الوراء لأكثر من أربعين عامًا عندما بدأت معضلة نموذج الكوارك، نكتشف أنه لم يأخذ العلماء هذا النموذج على محمل الجد (حتى المؤيد منهم للنظرية). إن فكرة أن البروتونات و النيوترونات وجسيمات أخرى تتكون من ثلاثيات من جسيمات أخرى تسمى الكوارك بعضًا منها له شحنة ١/٣ من شحنة الإلكترون، وبعض منها له شحنة ٢/٣ من شحنة الإلكترون كانت من الجرأة فى تصادمها لكل ما رسخ فى الأذهان

(*) قمنا بترجمة Quark بكلمة كُوَارك وتجمع كَوَارِك.

لدرجة أنها قدمت نفسها فقط على أنها نموذج رياضي يساهم في تبسيط الحسابات والتصميمات الخاصة بالطريق الثماني؛ حيث لم يكن في مقدورها الوقوف أمام ثوابت الفكر الكلاسيكي المدرسي منذ نهايات القرن التاسع عشر.

وبوجه عام فهذا يذكرنا بأن كل النماذج والأفكار الخاصة بالجسيمات الأولية ما هي إلا ابتكارات للعقل البشري في محاولة فهم ما يجري في عالم الجسيمات الدقيقة بلغة ما نراه و نعرفه في حياتنا اليومية. ومن العجيب أنه كلما ازدادت نظرية الكوارك رسوخًا كلما فقدنا هذا الشعور بأن كل هذه النماذج ما هي إلا ابتكارات للتخيل، وبدأ هذا النموذج في رسم صورة للبروتونات و النيوترونات على أنها تتكون من كمات صغيرة (حقيقية) هي الكوارك تقفز هنا وهناك داخل الحيز الذي كنا نسميه في السابق جسيم أولي (البروتون و النيوترون مثلاً). وهذه الصورة مستمدة من الصورة القديمة لتكوين الذرة من كتل صلبة هي الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وهي ليست دقيقة.

أيًا ما كان نصيبه من الحقيقة، فإن نموذج الكوارك نجح بشكل دقيق في وصف العديد من التفاعلات في عالم الجسيمات الدقيقة[١٤]. البروتونات والنيوترونات والبيونات التي تحمل القوى الشديدة، وهي الجسيمات المعروفة لدى الجميع يمكن تخيلها بواسطة نوعين من الكوارك وقد أطلق عليهم تسميات لتمييزهما عن بعضهما. أحدهما يسمى "علويًا" والآخر يسمى "سفليًا" والأسماء لا معنى لها؛ حيث يمكن للعلماء تسمية أحدهما أحمد والآخر علي[*] الكوارك العلوي له شحنة ٢/٣ و الكوارك السفلي له شحنة -١/٣ وهكذا نتصور أن البروتون مكون من كواركين علويين و كوارك سفلي، وبالتالي شحنته تكون + ١ .

---

(١٤) كان هناك العديد من الأفكار والنماذج بين أعوام ١٩٦٠ و١٩٧٠، ولم نتعرض هنا إلا لأقل من نصف هذه الأفكار والبحوث النظرية المنشورة لشرح ووصف وحل مسائل الفيزياء عالية الطاقة. ومرة أخرى أؤكد أننا قد التزمنا بالتعرض فقط للأفكار والنماذج التي استطاعت الصمود والبقاء حتى الآن؛ ذلك للاختصار وعدم الإطالة.

(*) المؤلف أورد اسمي Alice، Albert وقد تصرفنا في الأسماء للمحافظة على المعنى.

بينما يتكون النيوترون من كوارك علوى وكواركين سفليين، فيكون متعادلاً كهربيًا وشحنته صفر، أما البيونات فتوصف على أنها تتكون من زوج من الكوارك دائمًا كوارك ومضاد للكوارك مرتبطين معا. فمثلاً كوارك علوى ومضاد للكوارك السفلى ينتج "بى+". كوارك سفلى ومضاد للكوارك العلوى ينتج بيون (بى)، كما أن كواركًا علوى و ضده، أو كواركًا سفليًا وضده ينتجان "بى".

كل هذا هو تصور لما قد تكون عليه الجسيمات الأولية، ولكن قوة هذا التصور ظهرت عندما ابتكر جيل - مان و تسفايج نوعًا ثالثًا من الكوارك وهو "الغريب" لمعالجة خاصية "الغرابة" السابق الإشارة إليها، وطبقًا لعدد الكوارك الغريبة فى الجسيم واحد، اثنين أو ثلاثة يكتسب الجسيم -١، -٢ أو -٣ قيمة للغرابة والإشارة السالبة لها أصل تاريخى فقط، فالبروتون و النيوترون لا يوجد بهما كوارك "غريب" أما جسيم أوميجا فله قيمة غرابة تساوى -٣؛ لأنه مكون من ثلاثة كوارك "غريبة"، وهكذا فإن جميع الجسيمات الأولية فى نموذج الطريق الثمانى تسير على هذا المنوال بطريقة طبيعية كتنويعات ثلاثية من الكوارك أو ثنائيات كوارك ومضاد للكوارك . وبتحديد قيمة كتلة لكل نوع من الكوارك (الكوارك الغريبة أثقل ٥٠٪ من الأخريين) فقد أمكن الحصول على نتائج دقيقة لكتل جميع الجسيمات المعروفة. ويبقى السؤال الذى يتردد، هل لنموذج الكوارك هذا أى وجود فيزيائى؟ حتى جيل - مان الذى صك اسم كوارك(١٥) كان يتوارى حياءً وهو يقدم هذا التصور فى بحثه المنشور حيث قال:

"إنه من الطريف أن نخمن كيف يتصرف الكوارك إن كان جسيمًا ماديًا له كتلة محددة (بدلاً من أن يكون مجرد فكرة رياضية بحتة كما يجب أن يكون كحالة من حالات الكتلة اللانهائية). إن البحث عن وجود كوارك مستقرة الشحنات -٣/١ أو +٣/٢ أو مضاد للكوارك مستقرة بشحنات ٣/١ أو - ٣/٢ أو ٣/٤ فى المعجلات ذات القدرة

(١٥) أخذًا من "Three quarks for Muster Mark" Finnegans، والتى من مضمون الكلام تعطى النطق موسيقى "بارك" وليس "بورك".

العالية جداً سوف يكون له أهمية بالغة فى التأكيد على عدم وجود كوارك حقيقية"[١٦].

هل كان جيل - مان نفسه يعتقد فى حقيقة وجود الكوارك، ولكنه يحاول تسريب الفكرة فى علم الفيزياء كما لو كانت فقط مجرد حيلة ذكية؟ أو هل كان هو متشككا كما توحى كلماته؟ إن المؤكد أن تسفايج كان مقتنعًا؛ ولهذا السبب فقد واجه من النقد اللاذع أكثر مما وجه إليه من المديح.

ولد جورج تسفايج فى موسكو عام ١٩٣٧، ولكنه رحل مع والديه إلى أمريكا عندما كان طفلاً وحصل على البكالوريوس فى الرياضيات من جامعة ميتشجان عام ١٩٥٩. ثم التحق بكالتيك (معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا) للعمل كباحث، حيث أمضى ثلاث سنوات فى عمل مضنٍ بأحد المعجلات يطلق عليه "بيفرتون" قبل أن يتجه للعمل النظرى والتركيز على فهم الفيزيائيين لماهية العالم المادى تحت إشراف ريتشارد فينمان، وبما أنه دخل المجال حديثًا فقد كان يفتقد للحذر وحسن التصرف الذى اتصف به العلماء الأكبر منه. وحينما وجد أن نموذج الطريق الثمانى للباريونات و الميزونات يمكن أن يتم تفسيره من تشكيلات ثلاثية أو ثنائية من جسيمات أصغر، فقد قام على الفور باعتبار هذه الجسيمات الأصغر جسيمات حقيقية، وأطلق عليها الآسات (مفردها أس) كما وصفها فى أعماله. وقد أدى هذا التهور والاندفاع إلى إصابة رؤسائه بالرعب (فيما عدا فينمان) رعبًا اختلط بنجاح ما اعتبروها طريقة غير واقعية وغير حكيمة. حصل تسفايج عام ١٩٦٣ على منحة لمدة عام فى CERN حيث كتب بحوثه المعدة للنشر فى تقارير CERN، وانتهى إلى أن "بالرغم من الطريقة الفجة التى عالجنا بها المسائل، فإن النتائج التى حصلنا عليها تعتبر معجزة"[١٧]، هل كانت تلك حقيقة رؤيته، أو ربما

---

(١٦) من بحث جيل - مان فى مجلة Physics letters 8 pp214, 1964، وقد نقل عنها أيضًا أندروبيكرينج فى كتاب Constructing Quarks Edinburgh University Press pp.88 1984.

(١٧) ظهر تقرير CERN عام ١٩٦٤ تحت رقم ٤٠١ TH / ٨١٨٢، ٤١٢ TH /٨٤١٩ .
وتوجد نسخة أخرى مستعملة طبقًا لتقرير Pickering.

وُضِع وصف "طريقة فجة على لسانه بواسطة أشخاص آخرين؟ ظهرت هذه التقارير عام ١٩٦٤، وكان ظهورها أيضًا معجزة. عندما عرض الطالب تسفايج مسودات البحوث على رؤسائه فى CERN فقد استبعدت أول الأمر، وقد عرض تسفايج لهذا الأمر فى أحد مطبوعات كالتيك عام ١٩٨١:

"كان نشر تقرير CERN بالصورة التى طلبتها صعبًا جدًا، حتى إننى عزفت عن المحاولة فى نهاية الأمر. عندما كان قسم الفيزياء فى إحدى الجامعات المرموقة يرتب لى موعدًا. اعترض أستاذ الفيزياء النظرية (وهو أحد الفيزيائيين المرموقين) فى اجتماع مجلس الكلية بشدة واصفا نظرية "الآسات" بأنها من أعمال الدجالين(١٨).

أيًا ما كانت نظرة علماء الفيزياء النظرية عام ١٩٦٤ . فقد استمرت نظرية الكوارك تقدم قاعدة أساسية واضحة لحساب كيف تتصرف الهادرونات على أقل تقدير، وباستخدام أحدث تقنيات معجلات الجسيمات بدأ علماء الفيزياء التجريبية اختبار هذه الفرضيات بتسليط الإلكترونات عالية القدرة على البروتونات بقدرة عالية تكفى لإخراج الكوارك من داخل البروتونات. هذه التجارب استخدمت معجلاً خطيًا بطول ميلين فى ستانفورد بأمريكا يسمى SLAC(*)؛ حيث يتم إكساب الإلكترونات طاقة أكثر من ٢٠ ألف مليون إلكترون فولت (جيجا أ.ف) وتبين من دراسة تشتت الإلكترونات بعد التصادم أن الطريقة التى تتشتت بها الإلكترونات تظهر أن هناك مواضع تمثل تركيزًا

---

(١٨) انظر Isgur صفحة ٤٣٩ لسنة ١٩٨١ حيث يقول "تسفايج موارى جيل مان" أخبرنى أنه أرسل أول بحث للكوارك للنشر فى مجلة Physics letters؛ لأنه كان متأكدًا أن مجلة Physical review letter لن تنشره والمدهش أن "جيل – مان" حصل على جائزة نوبل عام ١٩٦٩ لمساهمات أخرى فى مجال الجسيمات الدقيقة مثل خاصية الغرابة ونموذج الطريق الثمانى. ولم تكن نظرية الكوارك حتى ذلك الوقت تعتبر هى الطريق الواضح لإحراز التقدم فى فهم الجسيمات الدقيقة. وكانت تمثل مرتبة متأخرة فى الإنجازات التى يشير إليها العلماء. ولم يحصل "تسفايج" على الجائزة على الرغم من أن نظرية الكوارك تعتبر أساسية الآن فى فهم الكون، ويعتبر النموذج الذى قدمه "تسفايج" عام ١٩٦٤ أكثر اكتمالاً وتفصيلاً من نموذج "جيل مان". هل ما زال تسفايج يدفع ثمن اندفاعه فى شبابه؛ وإلا فقد تهتدى لجنة نوبل يومًا لإنجازاته.

(*) Stanford Linear Accelerator.

للشحنة والكتلة والطاقة داخل البروتون تماماً كما فى تجربة رازرفورد التاريخية التى أظهرت وجود نواة مركزة داخل الذرة. وأيضًا فى نهاية الستينيات من القرن العشرين استخدم العلماء شعاعًا من النيوترينو فى معمل CERN بدلاً من شعاع الإلكترونات لسبر أغوار البروتون؛ حيث تبين أن هناك مناطق متعادلة الشحنة داخل البروتون. ولكن مهما كانت الجسيمات التى استخدمت فى التصادم فى البروتونات، وأيًا ما كانت طاقتها فما زال من المستحيل إخراج هذه الكوارك المزعومة من داخل البروتون. وتفسير وجود مادة متعادلة الشحنة داخل البروتون متلازمة مع الكوارك بسيط من ناحية المبدأ، وإن كان يثير التساؤلات عن ماهية النظرية التى يمكن أن تشرح لنا ما يجرى. فكما أن البروتونات و النيوترونات ملتصقة بعضها ببعض فى النواة بفعل تبادل البيونات التى تحمل القوة النووية الشديدة. كذلك الكوارك من الطبيعى أن تلتصق ببعضها بطريقة مماثلة عن طريق تبادل جسيمات سميت لواصق (Gluons) لأنها تلصق الكوارك بعضها ببعض لتكون البروتونات و النيوترونات. يبدو للوهلة الأولى أننا أدخلنا قوة جديدة خامسة، ولكن تفكير العلماء يتجه إلى اعتبار القوة اللاصقة هى نفسها القوى النووية الشديدة، وما كان يبدو أنه تفاعل للقوة النووية الشديدة ما هو إلا تأثير للقوى اللاصقة. تماثل هذه الحالة بشكل غير دقيق القوة الكهربية التى تربط الذرات بعضها ببعض داخل الجزئيات حيث تؤدى إلى نوع من القوة الكهرومغناطيسية بين الجزئيات.

ومع النجاح الذى حققه نموذج الكوارك من خلال التجارب العملية فى النصف الثانى من الستينيات، فإن هناك عدداً من المشاكل. لماذا تأتى الكوارك فى مجموعات من ثلاثة أو ثنائى كوارك ومضاد كوارك؟. على أن أعقد لغز كان جسيم أوميجا سالب، والذى توج تنبؤات نموذج الطريق الثمانى والجسيمات التى تقاسمت إحدى الخواص معه. وينظر لجسيم أوميجا سالب على أنه مكون من ثلاثة كوارك غريبة. ولكنها جميعًا لها نفس اتجاه اللف، وعلى ذلك فهى لها جميعًا نفس الحالة الكمية. كما أظهرت التجارب وجود جسيمات مكونة من ثلاثة كوارك علوية، ولها نفس اتجاه اللف أو ثلاثة كوارك سفلية، وأيضًا لها نفس اتجاه اللف. وهذا يتعارض مع كون الكوارك من فصيلة الفيرميونات

والتى تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولى الذى يحتم عدم وجود أكثر من جسيم لهم نفس الحالة الكمية، هل يمكن أن تتحدى الكوارك مبدأ الاستبعاد؟ أو أن هناك طريقة ما يمكن بها تمييز الكوارك المتماثلة داخل جسيم أوميجا والجسيمات الأخرى.

إن أى نظرية جيدة للكوارك يجب أن تجيب على الأسئلة السابقة بالإضافة لأسئلة أخرى. يجب أن تكون النظرية الجيدة المنشودة هى نظرية مجال. ولكن نظرية المجال هذه التى عادت للحياة فى السبعينيات والتى أدت إلى نظرية جيدة للكوارك، ثم في الثمانينيات رحب الأمل فى نظرية موحدة لكل المجالات لم تأت كنتيجة للتقدم فى بحوث الهادرونات ولكن فى بحوث اللبتونات و الفوتونات. هى نظرية جمعت القوى الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة فى إطار واحد سمى النظرية الكهربية – الضعيفة "Electro weak theory" ولكن قبل أن نرى كيف ظهرت النظرية الجديدة، وكيف ساعدت العلماء على إيجاد نموذج أفضل للقوة النووية الشديدة يجب علينا أن نقلب قليلاً فى جعبة الرياضيين وحيلهم لنرى كيفية استخدام أحد أهم أدواتهم.

قياس طبيعة الأشياء

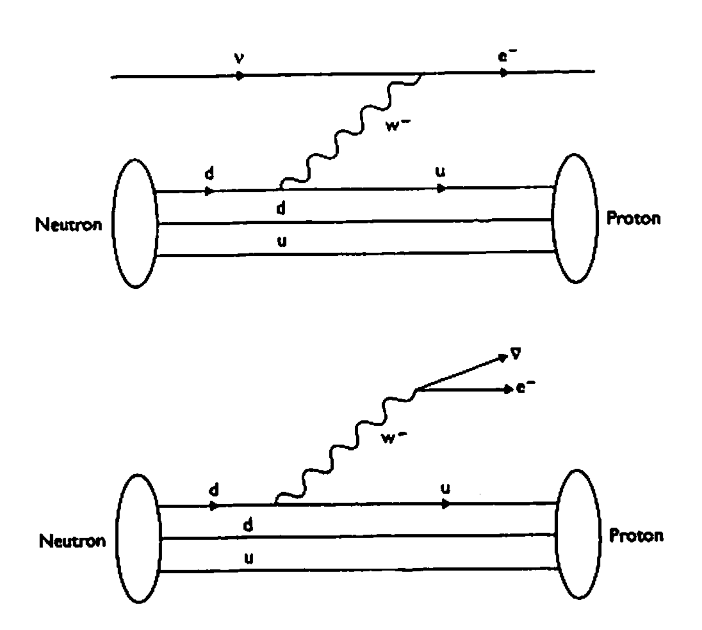
تحتوى تفاعلات الجسيمات فى العالم المادى فى الصورة الجديدة على أربعة جسيمات فقط، الكوارك العلوى و الكوارك السفلى والإلكترون و النيوترينو الخاص به. عندما ينحل نيوترون إلى بروتون يطلق إلكترونًا ومضاداً للنيوترينو. ماذا تقول نظرية الكوارك هنا؟ كوارك سفلى داخل النيوترون سوف يتغير إلى كوارك علوى ويطلق (جسيم W^-) والذى بدوره سوف يتحول إلى إلكترون ومضاد النيوترينو. ويمكننا النظر إلى هذا التفاعل بطريقة مختلفة هو تبادل حيث يعطى كوارك سفلى جسيم W^- وقتى إلى نيوترينو مما يجعله يتحول إلى إلكترون، ويتحول الكوارك السفلى إلى كوارك علوى. الإلكترون والنيوترينو هما المناظران فى عالم اللبتونات للكوارك العلوى والسفلى فى عالم الهادرونات. هذه التفاعلات يمكن تمثيلها على شكل مخطط فينمان مثل شكل ٢–٢ . من الناحية الرياضية، فإن جسيماً يتحرك للأمام فى الزمن يناظر تماماً مضاد الجسيم

الذى يتحرك رجوعًا فى الزمن. وعلى هذا فإن مخططا أساسيًا واحدًا يمكنه وصف جميع التفاعلات الأساسية.

تاريخيا، فإن فهم القوى النووية الضعيفة بدأ فى التطور قبل ظهور فكرة الكوارك، ولهذا فإن الأشكال والمعادلات كانت وما تزال تستخدم البروتون و النيوترون بدلاً من الكوارك العلوى والسفلى. وهذا لا يؤثر كثيرًا على مجريات الأمور وسوف نستخدم التمثيلين. ولكن من المهم جدًا تذكر كيفية وصف المواد الموجودة فى الكون وفى والشمس فى النجوم ومواد ما بين النجوم والكواكب وفى أنفسنا، يمكننا فهم ووصف كل ذلك انطلاقًا من أربعة جسيمات رئيسية (الكوارك العلوى و الكوارك السفلى والإلكترون و النيوترينو). وكل الفيزياء الموجودة فى هذا الكتاب وقوانين تطور الكون تظل كما هى إذا ما كانت هذه الجسيمات هى الموجودة فقط دون غيرها.

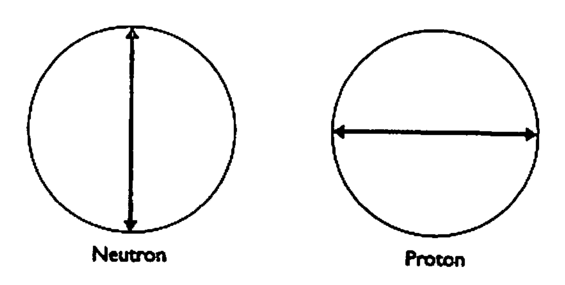
عندما حاول الفيزيائيون بناء نظرية مجال متكاملة للتفاعلات الضعيفة فى الخمسينيات كان من الطبيعى أن ينظروا إلى نظريات المجال المعروفة وقتئذ، مثل الجاذبية وبصفة خاصة الكهرومغناطيسية لتحديد ما يجب أن تشتمل عليه أى نظرية جيدة للمجال. التماثل هو أحد أهم الأفكار التى تستخدم فى وصف هذه المجالات، على سبيل المثال المجال الكهرومغناطيسى متماثل بالنسبة إلى القوى بين الجسيمات المشحونة. إذا ما أخذت صفًا من الجسيمات المشحونة بعضها موجب والآخر سالب، وقمت بقياس كل القوى المؤثرة فيما بينها، ثم قمت بتغيير إشارة كل الشحنات الموجبة إلى سالبة والسالبة إلى موجبة مع احتفاظهم بأماكنهم. فسوف تجد أن القوة المؤثرة على كل جسيم هى هى لم تتغير، هذا التماثل يسمى تماثلاً عاليًا. كل شحنة (بطريقة أدق كل شحنة فى الكون) يجب أن تعكس إشارتها فى نفس الوقت لنحصل على نفس المجال الأصلى للقوة.

يمكن استخدام خاصية التماثل فى وصف بعض الخواص الأخرى للجسيمات والقوانين الفيزيائية. الشحنات الموجبة والسالبة يمكن أن نفكر فيها على أنها انعكاس فى المرآة أو الوضع الانعكاسى لحالة من حالات الأشياء. إذا ما أهملنا القوى الكهرومغناطيسية، وأمعنا النظر فى باقى خواص البروتون و النيوترون نجد أنهما متشابهان تمامًا.



شكل (٢-٥) تصف النظرية الحديثة لتفاعلات الجسيمات انحلال بيتا بطريق أكثر عمقًا من تلك الواردة فى شكل ١-٤ . هنا واحد من الكوارك السفلية فى نيوترون يطلق جسيم W^- ويتحول إلى كوارك علوى، وبذلك يتحول النيوترون إلى بروتون، ويتفاعل جسيم W^- مع نيوترينو خارجى محولاً إياه إلى إلكترون (الشكل العلوى)، أو قد يتحول إلى إلكترون ومضاد للنيوترينو.

لدرجة أن الفيزيائيين يعتبرونهما حالتين (أو شكلين) من حالات شىء أساسى يسمى نيوكليون. ما الذى يحدد أن النيوكليون سوف يكون بروتونًا أو نيوترونًا؟ (بغض النظر عن مسألة الشحنة الكهربية) فكما أن لفظتى موجب وسالب ترمزان إلى حالتين من حالات الشحنة، وكما أن الكوارك تم تسميتها "علوية وسفلى" فقد أطلق الفيزيائيون اسمًا على الخاصية التى تميز البروتون و النيوترون وتسمى "اللف النظائرى" isotopic spin، وهى مجرد سهم يشير إما أعلى وأسفل (رأسيًا)، أو يمينًا وشمالاً (أفقيًا)، وهو لا يأخذ أى اتجاه فى الفراغ ثلاثى الأبعاد المعروف لدينا، ولكن فى فراغ رياضى تجريدى يمثل التركيب الداخلى للنيوكليون.



شكل (٢-٦) يمكن تمثيل الفارق بين البروتون و النيوترون بالاتجاه الذى يأخذه سهم تخيلى مرتبط بالنيوكليون. ويسمى هذا السهم اللف النظائرى.

دعنا نتخيل تغيير اللف النظائرى لكل النيوكليونات معًا بمعنى أن يتحول كل بروتون فى الكون إلى نيوترون، وكل نيوترون يصبح بروتونًا. هذا سوف يناظر تدوير اتجاه كل لف نظائرى ٩٠°. لماذا كل هذا العناء؟ هو لإثبات أن القوة النووية الشديدة لن تتأثر بهذا الدوران، تمامًا كما شرحنا فى حالة تغيير كل الشحنات السالبة إلى شحنات موجبة والعكس. هذا يعنى أن هناك تماثلا أساسيًا بين حالتى النيوكليونات كنيوترونات وبروتونات، أو بطريقة أعمق بين الكوارك العلوية والكوارك السفلية. عندما يتحول أحد النيوترونات إلى بروتون فى النواة، فإن التماثل الموضعى لهذا النيوكيلون يضطرب. إذن هناك تحول للتماثل الموضعى. ولكن قوانين الفيزياء تظل كما هى، تمامًا كما حدث عندما تحول كل بروتون فى الكون إلى نيوترون والعكس. كيف يتأتى للكون أن يعلم بهذا التحول الموضعى فى التماثل؟ فى هذه الحالة من خلال القوة النووية الشديدة نفسها. وهكذا فإن القوى الأساسية فى الطبيعة متداخلة بعمق فى هذا التماثل الأساسى. ليس فقط فى التماثل العالمى فى الكون ولكن التغيرات الموضعية للتماثل أيضًا.

هناك طرق عديدة يمكن أن تحدث بها التغيرات فى التماثل - ولكن لحسن الحظ - تلك التى ترتبط بالقوانين الفيزيائية هى أبسط الطرق من الناحية الرياضية. وتسمى فى العادة التماثل المقياسى "gauge symmetries" ولها أيضًا تماثل موضعى، ذلك الذى يقلل من خواصها ويجعل من الممكن حساب تأثيرها.

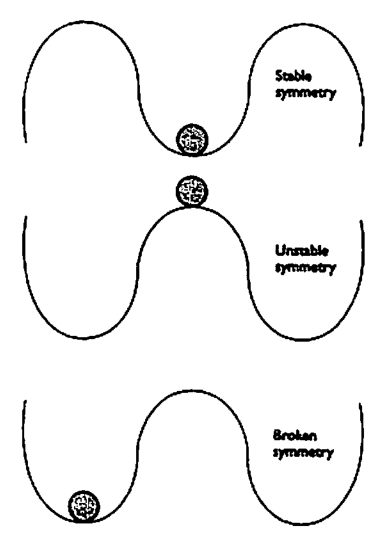
إن كلمة مقياس "gauge" هى مصطلح وضعه الرياضيون لوصف إحدى خواص المجال. وأدخل هذا المصطلح فى أعقاب الحرب العالمية الأولى، ووضعه العالم الألمانى هيرمان ويل الذى كان يحاول تطوير نظرية تجمع الكهرومغناطيسية (معادلات ماكسويل) والجاذبية (النسبية العامة). ويعرف التحول المقياسى بأنه ذلك التحول الذى يغير قيمة إحدى الكميات الفيزيائية فى جميع الأماكن فى الكون فى لحظة واحدة، ويقال للمجال إنه يمتاز بخاصية التماثل المقياسى إذا ظل بدون تغير بعد هذا التحول المقياسى. هناك مثال بسيط جداً تقدمه لنا منظومة الشحنات الكهربية التى استخدمناها قبل قليل. إذا ما وضعنا مثل هذه المنظومة فى المعمل، وقمنا بقياس كل القوى بين الشحنات نجد أنه لا يحدث أى تغيير فى هذه القوى إذا ما رفعنا شحنة المعمل كله لجهد كهربى عالٍ[١٩]. الشىء الوحيد الذى يؤثر هو الفرق بين الشحنات، وليس القيمة المطلقة للشحنات. نعرف جيداً أن الفأر يجرى بحرية تامة وسعادة بالغة، ولا يصاب بأى سوء فوق أحد قضبان المترو. إن كل جسم الفأر قد جرى رفع شحنته بنفس القيمة فلم يحدث أى تأثير أو يمر تيار كهربى خلال جسمه، ولكن المشكلة تحدث إذا ما لمس شخص ما أحد القضبان بينما لامس جزء آخر من جسمه الأرض، فهنا يسرى التيار خلال جسمه نتيجة لفارق الجهد الكهربى.

إذاً القوى الكهربية بين الجسيمات لا تتغير إذا ما تم رفع قيمة الجهد (الفولت) على كل شحنة بنفس القيمة، وفى نفس الوقت هذا اللا تغير المقياسى هو نوع آخر من التماثل يشترك فيه أيضاً مجال الجاذبية. ماذا يحدث إذا ما تم رفع عدد محدد من الشحنات فقط إلى جهد أعلى وترك الباقى بدون رفع؟ الآن يبدأ مرور التيار الكهربى تماماً كما يسقط شخص ما أو شىء ما على قضيب المترو. الشحنات المتحركة (فى التيار الكهربى المستحدث) سوف تنتج مجالاً مغناطيسيا جديداً يمكن أن يوصف من خلال جهد مغناطيسى مشابه للجهد الكهربى. وهذا المجال المغناطيسى يستعيد

---

(١٩) هذا ليس مجرد تصور أو تجربة خيالية، ولكنها قابلة للتنفيذ العملى، بل ونفذت بالفعل.

التماثل فى المعادلات التى تصف المنظومة. إذا ما تخيلنا إجراء أى مجموعة من التغييرات المعقدة على الجهد الكهربى فى المعمل أو فى الكون برفعه هنا أو خفضه هناك فيمكننا بطبيعة الحال ملاشاة تأثير هذه التغيرات إذا ما قمنا بإجراء تغييرات مضادة فى المجال المغناطيسى.



شكل (٢-٧) يمكن فهم كسر التماثل المكسور فى بعض الحالات من خلال الكرة والوادى. فى وجود وادٍ واحد تكون الكرة فى حالة تماثل مستقر. فى حالة وجود واديين حتى مع كونهما متماثلين إلا أن الكرة فى الوضع المتماثل تكون غير مستقرة (الشكل الأوسط) ويكفى أى تغيير بسيط ليدفع بالكرة إلى أحد الواديين حيث يصبح التماثل مكسوراً.

إذن فالمجال الكهرومغناطيسى والذى يشتمل على المجال الكهربى والمجال المغناطيسى هو لا متغير بالنسبة إلى التحولات المقياسية الموضعية ومعادلات ماكسويل تصف أبسط المجالات التى تخضع لمبدأ التماثل اللامتغير(*) ومعادلات النسبية الخاصة.

Symmetry invariance. (*)

هذا النوع من التماثل مرتبط بعمق بمبدأ التكافؤ فى النسبية العامة، حيث علمنا أينشتاين أن التسارع يمكن دائمًا ملاشاته بواسطة الجاذبية، لأن التسارع يماثل القوة. كما علمنا نيوتن أن القوة تساوى التسارع مضروبًا فى الكتلة. إذا تخيلنا أن المعمل يتحرك فى الفضاء بسرعة منتظمة، إذن لا يوجد تغيير فى جهد الجاذبية(*) من إحدى نهايات المعمل إلى النهاية الأخرى. وهذا موقف يشابه منظومتنا الكهربية التى رفعناها لقيمة واحدة للجهد الكهربى. إن التجارب فى هذا المعمل تؤكد تمامًا قوانين نيوتن. وهكذا فهى توضح تماثلاً يشابه التماثل الحادث فى منظومة الشحنات الكهربية فى المثال السابق. على الأرض يوجد فرق فى جهد الجاذبية بين أعلى المعمل وأسفله نتيجة الجاذبية الأرضية، هذا يماثل المنظومة الكهربية عندما يتم رفع جزء من المعمل إلى جهد كهربى أعلى من النهاية الأخرى. هنا التماثل لم يعد موجوداً.

إذا ما عدنا إلى معملنا التخيلى فى الفراغ، ولكن لنجعل المعمل يهتز قليلا، وذلك بأن نطلق محركات صاروخية من وقت لآخر مما يجعل المعمل يشعر بقوى غريبة تؤثر على مسارات الجسيمات، هذه القوى مناظرة لتلك الناشئة عن الجاذبية. حتى تجعل المعمل يتحرك فى دائرة على سبيل المثال، فيجب عليك أن تؤثر عليه بقوة ثابتة. سوف يستطيع ساكنو المعمل إثبات أنهم يتحركون فى دائرة عن طريق قياس القوى داخل المعمل، ولكن إذا كان المعمل فى مدار حول الأرض، فإن القوى التى من المفترض أن تظهر نتيجة الحركة فى دائرة، وليس فى خط مستقيم سوف تلاشيها قوة الجاذبية الأرضية فى هذه الحالة، سوف يبدو لساكنى المعمل أنهم فى حالة سقوط حر. من ناحية المبدأ هذه الحالة تناظر ما ذكر سابقًا عن إمكانية إنشاء جهد مغناطيسى يلاشى التغيرات فى الجهد الكهربى(*) إذن يمكن عمل مجال جاذبى متغير لتعويض الحركات الاهتزازية العنيفة الناشئة من المحركات الصاروخية. لنعيد صياغة ذلك بطريقة أخرى يمكنك (نظريا على الأقل) ترتيب الكتل المادية (الكواكب والنجوم والثقوب السوداء وغيرها)

---

gravitational potenial. (*)

حول المعمل الفضائى بحيث يسلك هذا المعمل طريقًا متعرجًا شديد الانحناءات والتعرج، ويظل ساكنوه يعتقدون أنهم فى حالة سقوط حر تمامًا كالمعمل الفضائى الذى يدور حول الأرض، ومع ذلك فقياس القوى بداخله يؤكد أنه فى حالة سقوط حر. لا يهم أن هذا الوصف ليس عمليًا تمامًا، ولكن المهم أن التماثل موجود فى المعادلات. المجال الجاذبى لا متغير بالنسبة للتحولات الموضعية المقياسية.

إن كل ما يمكننا معرفته عن القوى الطبيعية هو الطريقة التى تؤثر بها على حركة الأجسام حينما تحرف إلكترونًا هنا أو تلكز بروتونًا هناك. إن قوى الطبيعة الأخرى تلعب نفس الدور بالنسبة للجسيمات الأولية تمامًا كالدور الذى تقوم به الجاذبية فى الكون على اتساعه؛ حيث تقدم وسيلة لملاشاة الاضطرابات التى تسببها التحويلات الموضعية للتماثل. فى النظرية الكمية للكهرومغناطيسية QED القوة تعادل تبادل الفوتونات بين الجسيمات المشحونة. والتغيرات فى الجسيمات والمجالات المصاحبة لها تتلاشى لتحدث تماثلاً موضعيًا مقياسيًا، فقط إذا كان الفوتون جسيمًا ذا لف مقداره واحد وكتلته صفر. هذه الخواص للفوتون هى من ضرورات التماثل المقياسى. أو إذا أردت هنا تأكيد أن طريقة التماثل المقياسى هى المفتاح الذى يحل ألغاز الفيزياء، ماذا يحدث لو أن هذه الطريقة اقتبست من QED لوصف القوى النووية الضعيفة والشديدة ومجالاتها؟.

الفصل الثالث

البحث عن القوة الفائقة

إن الهدف المقدس(*) للفيزياء منذ استطاع أينشتاين صياغة نظرية مجال لقوى الجاذبية (النسبية العامة) هو إيجاد صيغة رياضية واحدة تجمع كل القوى الموجودة فى الطبيعة وتسمى نظرية التوحيد العظمى. بدأت المحاولات الأولى لتوحيد الجاذبية والكهرومغناطيسية فى نظرية واحدة فى العشرينيات من القرن العشرين، حيث كانتا هما النظريتان الوحيدتان للمجالات حتى ذلك الوقت فشلت هذه المحاولات وعلى الرغم من ذلك، فقد جرى إحياء بعض التقنيات التى استخدمت فى بناء تلك المحاولات الفاشلة لنظرية المجال الموحد، وقد أثبتت تلك الأفكار نجاحها تمامًا فى سياق فيزياء القرن الواحد والعشرين. تعتبر الجاذبية هى أضعف القوى المعروفة فى الطبيعة وأصعبها فى الدمج مع القوى الثلاث الأخرى، وتمتاز بأن مجال تأثيرها كبير جدًا (جسيم مجال الجاذبية ويسمى جرافيتون ليس له كتلة تمامًا كالفوتون). ولهذا فهو يغطى الكون على اتساعه، ويمكن لأى من قوى الطبيعة الأخرى التغلب بسهولة على قوة الجاذبية شريطة أن تعمل كل منهما فى نطاق مجال عملها. فالأمر يتطلب كتلة الكرة الأرضية بكاملها حتى تستقر ورقة وزنها أقل من جرام على سطح مكتبى بفعل الجاذبية. بينما أستطيع رفعها ضد قوة الجاذبية الناتجة عن كتلة الكرة الأرضية بكاملها، وذلك عن طريق دلك قلم

(*) استخدم الكاتب تعبير Holy Grail بمعنى الكأس المقدس وهو تعبير غربى، وقد رأيت أن تعبير الهدف المقدس يوصل المعنى بشكل أفضل فى الثقافة العربية.

من البلاستيك بقطعة من الصوف حيث تتكون شحنة كهربية على القلم، ثم أضع القلم المشحون أعلى الورقة فترتفع إليه بالقوة الكهربية. إذن الجاذبية هى قوة ضعيفة جداً. والسبب أن القوى الكهربية ليست ملحوظة على نطاق واسع فى الكون، هو أنه على المستوى العام الشحنات الموجبة و الشحنات السالبة متعادلة. و بالتالى فلا توجد شحنات فى الكواكب والنجوم والمجرات حتى يظهر تأثيرها القوى فى الكون. القوى النووية الشديدة والضعيفة كلتاهما أقوى كثيراً من الجاذبية، ولكن مجال عملهما محدود (لحسن الحظ)؛ لأن الجسيمات الحاملة لهذه القوة لها كتلة بالمقارنة بالفوتون و الجرافيتون. بصفة عامة فإن القوة النووية الشديدة أقوى ١٠٠٠ مرة من القوة الكهربية وحوالى ١٠٠.٠٠٠ مرة أقوى من القوة النووية الضعيفة (إذن القوة الكهربية أقوى ١٠٠ مرة من القوة النووية الضعيفة). ولكن القوة النووية الشديدة أقوى $١٠^{٣٨}$ مرة من الجاذبية، ولهذا فليس من المستغرب أن البحث عن نظرية موحدة للقوى النووية الشديدة والضعيفة والقوى الكهرومغناطيسية أسهل بكثير من محاولة توحيد قوة الجاذبية مع أى منهم.

حينما تبين للفيزيائيين أن عليهم أن يتعاملوا مع أربع قوى أساسية فى الطبيعة وليس اثنتين (كما كان معروفًا فى العشرينات قبل اكتشاف القوى النووية) ازداد إحباطهم فى مسألة المجال الموحد. عدد من الباحثين ومنهم العالم الكبير أينشتاين استمروا فى محاولة صياغة المعادلات التى يمكن أن تؤدى إلى نظرية مجال موحد يجمع الجاذبية، والكهرومغناطيسية، القوتين النوويتين الأخريين فى إطار واحد. ولكن حتى أينشتاين لم يكتب له النجاح على الرغم من أنه أمضى الثلاثين عامًا الأخيرة من حياته محاولاً توحيد الجاذبية والكهرومغناطيسية. وحينما بدأ النجاح يلوح فى الأفق، فقد بدأ من حيث اعتبره أينشتاين نهاية الخيط. لقد بدأ عمله من قوة الجاذبية التى تغمر الكون كله على اتساعه، ولكن العلماء اليوم يعتقدون أن الجاذبية هى محطة النهاية. سوف يتم إضافة قوى الجاذبية فى نهاية الأمر بعد الوصول إلى نظرية مجال موحد للقوى الثلاث الأخرى. لقد بدأ العلماء خطوة بخطوة من القوى المؤثرة داخل الذرة، ثم – بدءًا من القوتين المتقاربتين فى الشدة – ثم يتم تعميم النظرية لتشمل الكون كله.

بدأ العلماء فى صياغة نظرية مجال للقوة النووية الضعيفة، ثم تم إضافة القوة الكهرومغناطيسية؛ حيث تم الحصول على نظرية موحدة للمجال الكهربى والقوة النووية الضعيفة. واليوم هناك نظرية مقياسية للقوة النووية الشديدة، كما توجد إرهاصات عن كيفية الجمع بين نظرية المجال الكهربى - النووى الضعيف مع نظرية المجال النووى القوى فى نظرية شاملة. ليست هناك نظرية واحدة شاملة، ولكن السمات الواضحة لمثل هذه النظرية تم تحديد خطوطها العريضة. ويبقى الأمل الحقيقى فى الجمع بين هذه النظرية الشاملة والجاذبية.

هذا التطور فى النهاية يتضمن فهما كاملاً لتفاعلات الجسيمات متناهية الصغر ذات الطاقات العالية جداً، وهى طاقات تناظر كثافة مادية أكبر بكثير جداً مما هو موجود داخل النواة، ولهذا فالخطوات إلى الأمام نحو نظرية مجال موحد هى فى نفس الوقت نحو الوراء للحظة الخلق، ووجود الكثافة المادية العالية والطاقة العظيمة والتى تسمى بالانفجار الكونى العظيم. تخبرنا النظريات بالظروف و الأحوال التى كانت سائدة فى الكون فى أجزاء من اللحظة الأولى للخلق كما شرحت فى كتابى "بحثا عن الانفجار العظيم"(*). وفى هذا إشارات واضحة تماماً أن هذه النظريات حول الكوارك واللبتونات تصل إلى الفهم الأساسى للفيزياء. إن نجاح هذه النظريات فى تفسير نشأة الكون - التوافق بين فيزياء الجسيمات وعلوم الكون - هو أحد أفضل المؤشرات أن هذه النظريات حول القوى والجسيمات تتطور فى الطريق الصحيح.

إذا استطاعت هذه النظريات الجديدة أن تثبت نفسها، وهذا ما يبدو حتى الآن، فإن الفيزياء سوف تكون قد حققت أقصى أحلامها فى وصف كل شىء من خلال مجموعة واحدة من المعادلات، وهذا سوف يقتضى فهما للانفجار العظيم نفسه منذ لحظة الخلق حتى نهاية الزمن. إن نظرية المجال الموحد - التى أطلق عليها بول دافيز القوة العليا - هى المفتاح لفهم ليس فقط كيف يعمل العالم اليوم، ولكن أيضاً كيف كان

In Search of the Big Bang. (*)

من الضرورى أن يصل إلى الحالة التى نراها عليه اليوم. والبحث الناجح عن القوة العليا يتبع محاولات جرت فى ١٩٥٤ بعد وفاة أينشتاين بعام واحد. عندما نشر أحد العلماء وهو صينى المولد، ويعمل فى الولايات المتحدة الأمريكية مع زميل أمريكى بحثًا لتطبيق فكرة النظرية المقياسية على القوة النووية الشديدة. لم يكن بحثهما ناجحًا بصفة خاصة فى وصف القوى الشديدة، ولكنه مثل اقتحامًا لمجال جديد شجع العديد من الباحثين بعد ذلك لاستخدام نفس الأفكار فى معالجة مسائل أخرى. والعجيب أن أول ثمار هذا الاقتحام للقوة الشديدة كان فهما أكثر للقوة النووية الضعيفة.

توحيد القوة الكهربية - النووية الضعيفة

ولد تشين ننج ينج فى الصين فى هيفى عام ١٩٢٢ . وكان والده أستاذًا فى الرياضيات. درس ينج فى جامعات كون مينج وتسين جهوا؛ حيث حصل على الماجستير قبل أن ينتقل إلى شيكاغو عام ١٩٤٥ ليدرس الدكتوراه ويحصل عليها عام ١٩٤٨، ثم عمل لمدة عام كمساعد لإنريكو فيرمى، ثم التحق عام ١٩٤٩ كمحاضر بمعهد الدراسات المتقدمة فى برينستون حيث ظل حتى ١٩٦٥، كان ينج مهتما بوضع نموذج للقوة الشديدة يتوافق مع خطوط نظرية الكهروديناميكا الكمية، وعمل على هذا المشروع بطريقة متقطعة خلال فترة تواجده بشيكاغو وحتى عام ١٩٥٤ بنجاح محدود. ثم أمضى عامًا بعيدًا عن برينستون فى معامل بروكهايفين القومية حيث عمل مع روبرت ميلز فى مكتب واحد.

استطاع ميلز و ينج معًا إنجاز نظرية مجال لا متغير مقياسيًا للتفاعلات الشديدة. وكان التماثل المهم فى نظرية ميلز - ينج هو تماثل اللف النظائرى الذى سبق شرحه. فى هذا الوصف للنيوكليونات تمثل البروتونات و النيوترونات بأسهم رأسية وأفقية على الترتيب فى فضاء رياضى. وإذا كان هناك تماثل موضعى، فإن ذلك يعنى أنه من المسموح به تغيير اللف النظائرى للنيوكليونات فى أماكن مختلفة من الكون وفى أوقات مختلفة. وبمعنى آخر، هناك تفاعلات ينتج عنها تحول بروتونات إلى نيوترونات والعكس.

إن التماثل العالمى البسيط يسمح (نظريًا) فقط بتغيير كل النيوترونات إلى بروتونات وكل البروتونات إلى نيوترونات فى نفس الوقت.

وكما فى النظريات المشابهة من هذا النوع، فإن الطريقة التى تحفظ التماثل هى من خلال إضافة شىء أخر يعادل التغيير الذى أحدثناه. فى نظرية ينج - ميلز، فإن قوانين الفيزياء تظل بدون تغيير حتى بعد إحداث أى تغيير اختيارى فى اتجاهات اللف النظائرى، وذلك عن طريق إضافة ست مجالات متجهة. اثنان منهما يكافئان (من الناحية الرياضية) المجال الكهربى والمجال المغناطيسى العادى. وهما معًا يصفان الفوتون الذى يحمل القوة الكهرومغناطيسية. والمجالات الأربعة الأخرى إذا ما أخذت أزواجًا تصف جسيمين جديدين، وهما يماثلان الفوتون، ولكن لهما شحنتان، أحدهما موجب والآخر سالب. أما التفاعلات الناشئة عن هذه الجسيمات فهى معقدة جدًا كما تم عرضها فى النظرية.

كان واضحًا أن هذه الطريقة لفهم القوة الشديدة كانت قاصرة على أقل تقدير. بداية فجميع "الفوتونات" ليس لها كتلة، مما يعنى أن لها حيز عمل لا نهائى، وهذا يتعارض مع حقيقة أن القوة النووية الشديدة لها أصغر حيز عمل فى القوى الأربع وعلى هذا فجسيماتها يجب أن تكون الأثقل. ولكن الأفكار المتضمنة فى النموذج كانت وما تزال مهمة. وللتبسيط نقول إن الفوتونات ذوات الشحنات المختلفة يمكنها الالتصاق معًا كالبروتونات والإلكترونات. لعمل ذرة لمجال القوة النووية الشديدة. وإذا تعمقنا قليلاً، فإن أحد أهم الاكتشافات الأساسية والذى كان له نتائج مهمة فى تطوير نظريات التفاعلات الأربع كان بسبب وجود الفوتونات المشحونة؛ حيث إن نتائج حدوث تحويلات متتالية مع الأجسام الأولية يعتمد تمامًا على ترتيب أحداث هذه التحويلات.

قد تبدو العبارات السابقة معقدة. إذن دعنا نتناول الموضوع خطوة خطوة، إن الإلكترون مثلاً يمكن تغيير حالته عن طريق امتصاص أو إشعاع فوتون ضوئى. إذا امتص الإلكترون أولاً الفوتون ثم أشعه أو أشع فوتونًا أولاً ثم امتصه ثانية،

فإنه دائمًا ينتهى فى نفس الحالة تمامًا؛ أى أن ترتيب الأحداث لا يؤثر فى النتيجة النهائية فى هذه الحالة، ونسمى هذه الخاصية لنظرية QED بخاصية التبديل[1] "Abelian".

الأعداد الطبيعية تتصرف على هذا النحو، فنحن نعلم أن حاصل ضرب ٢ × ٤ يساوى حاصل ضرب ٤ × ٢ كما أن مجموع ٦ + ٧ يساوى مجموع ٧ + ٦، فالأرقام يمكن تبديلها (أبلية Abelian) ونستطيع أن نقول بصفة عامة إن:

أ × ب = ب × أ

ولكن فى نظرية الكم، فإن هذه القاعدة ليست صحيحة دائمًا فسوف نجد أن:

أ × ب # ب × أ

وفى هذه الحالة نقول إن المتغيرات أ، ب لا تبديلية أو لا أبلية (non-Abelian) نفس الشىء يحدث للفوتونات المشحونة فى نظرية ينج - ميلز. فإذا تخيلنا جسيما من فصيلة الهادرونات سوف يتم تغييره بتدوير اللف النظائرى مرة، ثم يتم تدويره مرة أخرى بواسطة دوران آخر، فإن الحالة التى ينتهى إليها الجسيم سوف تعتمد على ترتيب الأحداث. إن نظرية ينج - ميلز لا أبلية، وتسمى نظرية ذات مقياسية محلية (موضعية) لا أبلية Non-Abelian gauge theory، كما تبين أن كل نظريات المجال توصف من خلال نظريات مقياسية لا أبلية حتى الكهرومغناطيسية كما سوف نرى هى جزء من نظرية أكبر لا أبلية.

قد يبدو هذا معقدًا إلى حد ما. ولكن يمكنك تصور تحويل لا تبديلى باستخدام كتاب تضعه أفقيًا مسطحا على الطاولة، بحيث يواجهك غلافه تمامًا إذا دورت الكتاب بزاوية ٩٠° رأسيًا عن طريق إمساك الجهة البعيدة عنك من الغلاف الأمامى ورفعت الكتاب، فإنه سوف يقف رأسيًا على الطاولة حيث يواجهك الغلاف أيضًا. الآن انظر إلى

---

(١) نسبة إلى نيلز هنريك أبل العالم الرياضى النرويجى الذى عاش من ١٨٠٢ - ١٨٢٩، وقام بإضافات مهمة فى فرع الرياضة المسمى بنظرية المجموعات. وكانت وفاته المبكرة صدمة للرياضيين فى القرن التاسع عشر.

الغلاف وأدر الكتاب ١٨٠° درجة أفقيا، سوف يكون الكتاب واقفا، ولكن ظهر الكتاب سوف يواجهك. الآن حاول أن تبدأ من الوضع الأول؛ حيث كان الكتاب أفقيًا وغلافه مواجه لك. ولكن سوف تقوم بالتحويلية بطريقة معكوسة أى تبدأ بالأخير. إذن أدر الكتاب ١٨٠° أفقيا سوف يظل الكتاب فى وضعه الأفقى، ولكن أصبحت الكتابة مقلوبة، الآن أدر الكتاب ٩٠° رأسيا برفع الطرف البعيد عاليا. سوف تنتهى بأن الغلاف الأمامى مواجه لك، ولكن الكتاب أعلاه أسفله إنه نفس الكتاب ونفس الطاقة المبذولة، ولكن الحالة النهائية مختلفة. أنت الآن قمت بإجراء تحويلتاين لا تبديليتاين للكتاب.

وبالرغم من إدراك الفيزيائيين النظريين فى الخمسينات أن نظرية ينج - ميلز تحتاج لقليل من الجهد، فإن نظريات أساسية كهذه قد أدت إلى تشجيع أفكار جديدة للظهور وكانت من الأهمية بمكان بحيث أدت إلى طبع بحوث النظرية عام ١٩٥٤[٢]. لقد تطلب الأمر عشرين عامًا من جهود العلماء المضنية حتى تمكن العلماء النظريون من تحويل هذه الأفكار إلى نظرية متكاملة للقوة الشديدة، وكان التقدم بطيئًا جدًا حتى عام ١٩٦٠، ثم ظهرت الكوارك كأشياء أساسية تدخل فى التفاعلات واللواصق، هى الحاملة للقوة الشديدة. ولكن فى ذات الوقت استخدمت أفكار مشابهة لتوحيد الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة فى نظرية موحدة للكهربية - الضعيفة.

ولد جوليان شفينجر طفل الرياضيات المعجزة عام ١٩١٨ ودخل كلية سيتى كولدج فى نيويورك وهو فى الرابعة عشر. ثم انتقل إلى جامعة كولومبيا حيث حصل على البكالوريوس فى سن السابعة عشر والدكتوراه بعدها بثلاث سنوات. وقد عمل مع روبرت أوبنهايمر (أبو القنبلة الذرية) فى جامعة كاليفورنيا، ثم عمل فى شيكاغو ثم معهد ماساشوستس MIT قبل أن يعمل فى جامعة هارفارد عام ١٩٤٥، وبعدها بعام واحد فى سن الثامنة والعشرين أصبح من أصغر الأستاذة المختارين فى مجموعة

---

(٢) هنا نذكر عرضًا سيرة عالم كان يفكر فى ذات الاتجاه بطريقة موازية، وهو رونالد شو وهو تلميذ عبد السلام فى كامبريدج. وقد توصل إلى نموذج مشابه لـ (ينج - ميلز) ولكن كانا قد سبقاه فى نشر بحثهما فى مجلة Physical Review فى أكتوبر ١٩٥٤ مجلة ٩٦ صفحة ١٩١ .

أوجست. وقد قدم شفينجر إسهامات كبيرة فى صياغة نظرية QED وفى عام ١٩٦٥ حصل على جائزة نوبل مشاركة مع ريتشارد فينمان وشين أشيرو توموناجا من جامعة طوكيو لهذا العمل(٣).

لهذا كان شفينجر الشخص المناسب تماماً ليأخذ أفكار ينج - ميلز ويطبقها على القوة الضعيفة والكهرومغناطيسية. إن قوانين اللعبة مختلفة تماماً مع القوى الضعيفة. إذا أخذنا انحلال بيتا، على سبيل المثال، يتحول نيوترون إلى بروتون، وعلى هذا فإن تماثل اللف النظائرى سوف يختل. ولكن فى نفس هذا التفاعل فإن نيوترينو سوف يتحول إلى إلكترون (أو قد ينتج إلكترون ومضاد للنيوترينو هو ما يؤدى إلى ذات النتيجة) أى أنه فى عالم اللبتونات هناك تحول موازٍ للتحول فى اللف النظائرى الحادث فى عالم الهادرونات. وهذا يؤدى إلى فكرة "اللف النظائرى الضعيف" "weak isospin" وهو متغير كمى يماثل "اللف النظائرى" ولكنه يستخدم مع اللبتونات، وكذلك مع الهادرونات. فى عام ١٩٥٧ اقتبس شفينجر نظرية المقياس الموضعى اللاتبديلى التى وضعها ينج - ميلز للقوة الشديدة، وطبقها على القوة الضعيفة والكهرومغناطيسية "QED" معاً. وكما فى نظرية ينج - ميلز، فإن نظريته تحتوى على بوزونات متجهة جديدة أحدها بدون شحنة والآخران يحملان شحنات، وكما فعل ينج و ميلز فقد سمى كمات المجال غير المشحونة بالفوتونات. ولكن بالمخالفة لنظرية ينج - ميلز فإن البوزوتين المشحونين قد سميا W^+ و W^- وهما حاملان للقوة الضعيفة. وتبقى مشكلة الكتل يجب إضافة الكتلة إلى جسيمات W بطريقة يدوية. وهذه النظرية أيضاً على الرغم من نقاط الضعف بها، فهى تثير عدداً من الأفكار الجيدة. لقد أظهرت أن القوة الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية كانتا متقاربتين فى الشدة وبشكل ما متماثلتين ولكن هذا التماثل غير كامل حيث إن جسيمات W لها كتلة، وبالتالى فنطاق عملها محدود بينما الفوتونات لا كتلة لها ونطاق عملها لا نهائى.

---

(٣) ولد توموناجا عام ١٩٠٦ وتوفى عام ١٩٧٩، وعمل بمعزل عن العلماء الأمريكيين ونشر بحوثه أولاً عام ١٩٤٣ . أما فينمان و شفينجر فقد عملا مستقلين ونشرا بحوثهما فى QED بعد الحرب مباشرة. وقد عرف بحث توموناجا لمتحدثين الإنجليزية عام ١٩٤٧ . وقد توصل ثلاثتهم إلى نفس النموذج الرياضى للنظرية، ولكن بثلاثة طرق مختلفة، وهو ما أكد على سلامة النظرية التى توصلوا إليها.

أدى هذا إلى طريقين للوصول إلى نظرية المجال، أثبت سيدنى بلودمان من جامعة كاليفورنيا – بالاستعانة بنظرية ينج – ميلز عام ١٩٥٨ إمكانية وصف القوة الضعيفة فقط من خلال نظرية مقياسية موضعية لا تبديلية باستخدام ثلاثة جسيمات W^-، W^+ و Z حيث أضاف بوزونًا ثالثًا متجهيًا لا شحنة له. هذا التطور أخرج الكهرومغناطيسية خارج الاهتمام لفترة من الوقت وفى نفس الوقت أوضح ضرورة وجود تفاعلات للقوة الضعيفة لا يحدث بها تغيير فى الشحنات الكهربية، وتلك التفاعلات تتم من خلال الجسيم Z المتعادل، وتسمى بتفاعلات التيار المتعادل. كل هذه الكمات للمجال مازالت عديمة الكتلة فى نظرية بلودمان، ولهذا ظل هذا النموذج النظرى بعيداً عن الواقعية. ولكن قد يكون أقرب للإجابة من النماذج الأخرى.

فى هذه الأثناء كان الفيزيائى شيلدون لى جلاشو المولود فى برونكس عام ١٩٣٢، وتخرج فى جامعة كورنل ١٩٥٤ يدرس لدرجة الدكتوراه فى هارفارد تحت إشراف شفينجر. وقد وجد طريقة لتطوير نظرية بلودمان، وقام بربطها مع الكهرومغناطيسية فى نموذج نشره عام ١٩٦١ ويشتمل على مجموعة ثلاثية (Triplet) للبوزونات المتجهة تحمل القوة النووية الضعيفة و بوزون أحادى يحمل القوة الكهرومغناطيسية. إن الفائدة المباشرة لهذه الطريقة هى أنها أثبتت أنه من الممكن خلط المجموعة الثلاثية والأحادية حيث تنتجان بوزونًا ثقيلاً جدًا هو Z المتعادل مع ترك الباقيين بدون كتل (الفوتون) بدلا من إيجاد جسيمين متعادلين لهما كتل. ولكن يجب أن تدخل الكتلة يدويًا حيث يتحطم التماثل بين الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة فى المعادلات الأساسية. والأسوأ من ذلك كله أن النظرية ليست سوية(*)، ولكنها تقع فى مشكلة اللانهاية التى حدثت مع QED، وأمكن تجاوزها بحيلة رياضية. على أن وضع الكتلة يدويًا فى حالة القوة الضعيفة قد جعل من المستحيل إجراء الحيلة الرياضية لإعادة التسوية والهروب من مشكلة اللانهاية.

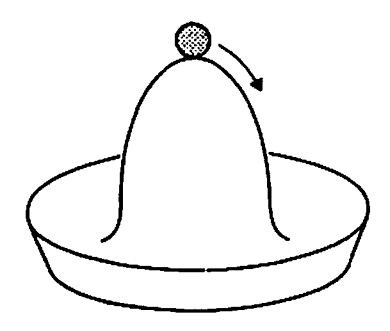
(*) لفظ "سوية" ترجمة لمصطلح "mormalized" بمعنى أن قيم الطاقة لا تتزايد إلى ما لانهاية، ولفظ "إعادة التسوية" هو ترجمة لمصطلح (renormalization) بمعنى إيجاد طريقة رياضية ينتج عنها وجود لا نهايتين إحداهما سالبة و الأخرى موجبة بحيث تلاشى كل منهما الأخرى وتصبح النظرية سوية مرة أخرى.

فى ذات الوقت قام كل من الباكستانى عبد السلام وزميله جون وارد بين الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين بتطوير نظرية كهرو - ضعيفة مشابهة لتلك المقدمة من جلاشو. ولد عبد السلام فى جانج فى باكستان عام ١٩٢٦، وأنهى دراسته فى جامعة البنجاب، ثم التحق بكامبريدج حيث حصل على الدكتوراه عام ١٩٥٢، وقام بالتدريس فى جامعات لاهور والبنجاب حتى ١٩٥٤ حيث عاد إلى كامبريدج، وقد أشرف على رسالة الطالب رونالد شو. عادة ما تشير نقطة بحث الطالب إلى اقتراحات المشرف عليه. فقد كان عبد السلام مهتما بالنظريات المقياسية للقوى الأساسية فى الطبيعة فى اتجاه نظرية ينج - ميلز. حصل عبد السلام على وظيفة أستاذ الفيزياء النظرية فى الأمبريال كولدج فى لندن. وفى عام ١٩٦٤ كان هو القوة الدافعة وراء إنشاء المركز العالمى للفيزياء النظرية فى تريستا، وهو المعهد الذى يقدم فرص بحثية للفيزيائيين من العالم الثالث. وحتى وفاته عام ١٩٩٧كان عبد السلام هو مدير المركز فى تريستا كما كان يقضى بعض الوقت فى إمبريال كولدج. كانت نظرية عبد السلام ووارد (كان وارد عالمًا إنجليزيًا عمل فى عدد من المؤسسات العلمية الأمريكية ومنها جامعة جون هوبكنز) تعانى من نفس المشاكل التى ظهرت فى نظرية جلاشو، أى أن الكتل يجب إضافتها يدويا، وهو ما يمنع إجراء حيلة إعادة التسوية لتجنب مشكلة اللانهاية. كانت الخطوة الأولى لحل هذه المشكلة عام ١٩٦٧ عندما تمكن عبد السلام منفصلاً عن الفيزيائى الأمريكى ستيفن واينبرج من التوصل إلى الطريقة التى تجعل كتل البوزونات الحاملة للقوى الضعيفة تظهر بطريقة طبيعية من المعادلات (أو تقريبًا طبيعية)، والحيلة تتضمن كسرًا تلقائيًا للتماثل وأيضًا اعتمدت على أفكار مشابهة لتلك التى استخدمت مع المجال الشديد.

ولفهم كسر التماثل بطريقة سهلة يمكننا اللجوء إلى أضعف القوى "الجاذبية" يعرف رواد الفضاء أنهم فى داخل المعمل الفضائى إذا ترك قلم فإنه يتحرك فى أى اتجاه يدفعه إليه رائد الفضاء، أى أنه لا يوجد اتجاه متميز عن الاتجاهات الأخرى، بل كل الاتجاهات متماثلة، ولكن على سطح الأرض، فالوضع مختلف فلو دفعت قلمًا فى أى اتجاه فإنه دائمًا يسقط فى اتجاه واحد إلى أسفل دائمًا. ونعنى بالاتجاه إلى أسفل أى إلى منتصف الكرة الأرضية، وهذه القاعدة تنطبق سواء كنت فى القطب الشمالى أم القطب الجنوبى دائمًا يتجه إلى مركز الأرض، ولكن هذين الاتجاهين متعاكسان؛ أى أن التماثل البسيط فى الفراغ قد تم كسره نتيجة وجود مجال الجاذبية الأرضية.

شكل آخر من أشكال التماثل المستتر يكمن فى القضيب المغناطيسى، والذى يفضل دائمًا الاتجاه الشمالى - الجنوبى، مع أن المعادلات الأساسية للكهرومغناطيسية متماثلة. هذا الشكل من أشكال التماثل المستتر ناقشه الفيزيائى فيرنر هايزنبرج الذى استنتج علاقة اللاحتمية فى فيزياء الكم.

على أن أبسط الأمثلة فهمًا تشتمل على الجاذبية مرة أخرى. تصور سطحًا ناعمًا أملس تمامًا على شكل القبعة المكسيكية (شكل ٣-١) وتمتاز بأن حافتها مرفوعة لأعلى. إذا استقرت القبعة أفقيًا تمامًا فسوف تكون متماثلة بشكل كامل بالنسبة لمجال الجاذبية الأرضية، تخيل أننا وضعنا كرة مستديرة ملساء على قمة القبعة المتوسطة حتى الآن كل شيء متماثل تمامًا طالما الكرة ثابتة ولم تتحرك. نحن نعلم تمامًا ما سيحدث فى هذه الحالة. الكرة ليست مستقرة وسوف تتحرك فى لحظة ما وتسقط من أحد الجوانب إلى قاع الوادى الدائرى المحيط بالقبعة. عند حدوث ذلك، فإن الكرة والقبعة لم تعودا متماثلتين فهناك اتجاه مفضل، وهو الاتجاه المحدد من مركز القبعة إلى مكان وجود الكرة المستقر على حافة القبعة إن المنظومة الآن مستقرة وفى أقل مستويات الطاقة الممكنة ولكنها ليست متماثلة. لقد اتضح أن الكتل الخاصة بجسيمات المجال فى نظرية ينج - ميلز يمكن أن تأتى من كسر مشابه للتماثل فى الفراغ الخاص الذى تمثل فيه متجهات اللف النظائرى.



شكل (٣-١) تماثل القبعة المكسيكية. الكرة على قمة القبعة تمثل وضعًا غير مستقر ولكنه متماثل. وينكسر هذا التماثل بمجرد سقوط الكرة فى أى الاتجاهات (انظر أيضًا شكل ٢-٧).

اختمرت الفكرة خلال الخمسينيات والستينيات من خلال عدد من البحوث الفيزيائية الرياضية. ولكنها أثمرت على يد بيتر هيجز من جامعة أدنبره بين عامى ١٩٦٤ و ١٩٦٦ . درس هيجز فى كلية كينجز فى لندن منذ ١٩٤٧ وحتى حصوله على الدكتوراه عام ١٩٥٤ . وعين فى ادنبره عام ١٩٦٠ وعلى الرغم من أن الخط الفكرى وراء الآلية التى قدمها هيجز مستعص جداً على التناول هنا، فإن النتائج يمكن شرحها بالأسلوب الذى اتبعناه فى هذا الكتاب. افترض هيجز أنه لابد من وجود مجال إضافى على نموذج ينج – ميلز على أن يكون لهذا المجال خاصية غير عادية، وهى أنه ليس فى أقل مستوى للطاقة عندما تكون شدة المجال صفراً، ولكن عندما يكون للمجال قيمة أكبر من الصفر. وللتذكرة فإن المجال الكهرومغناطيسى وعدد من المجالات لها طاقة تساوى صفراً عندما تكون شدة المجال صفراً. والحالة التى تكون فيها هذه المجالات فى أقل مستوى للطاقة هى ما نسميه الفراغ. إذا كانت جميع المجالات مثل المجال المغناطيسى، فإنه يمكننا القول إن جميع المجالات تساوى صفراً فى الفراغ، ولكن مجال هيجز له قيمة غير صفرية حتى فى أقل مستوى للطاقة، وهذا سوف يعطى للفراغ خواصاً أخرى لم يكن ليحصل عليها بطريقة أخرى. حتى يمكن الحصول على قيمة صفرية لمجال هيجز يجب أن نزوده بطاقة خارجية.

إن تداعيات هذه الفكرة كانت مهمة جداً حيث وفر المجال المقترح بواسطة هيجز المرجعية اللازمة، أو لنقل منظومة الإحداثيات أو الاتجاه المرجعى الذى يمكن بواسطته تحديد ما إذا كان اتجاه اللف النظائرى يشير إلى بروتون أو إلى نيوترون. إذن يمكن تمييز البروتون من النيوترون بمقارنة اتجاه اللف النظائرى مع الاتجاه المحدد بواسطة مجال هيجز. إذا أثر تحويل مقياسى على اتجاه اللف النظائرى وقام بتدويره زاوية ما، فإن سهم هيجز سوف يدور هو أيضًا بنفس القيمة بحيث إن الزاوية بين اللف النظائرى وسهم هيجز تظل ثابتة حتى بعد إجراء التحويل المقياسى. يعنى هذا أن الزاوية التى كانت تشير إلى نيوترون أصبحت تشير إلى بروتون والعكس. بدون الآلية التى ابتدعها هيجز لم يكن ممكنا معرفة الفرق بين البروتون والنيوترون؛ لأنه لم يكن هناك ما يمكن قياس اللف النظائرى بالنسبة له.كل ما يمكن قياسه هو الزاوية النسبية

بين اللف النظائرى واتجاه سهم هيجز، وليس الاتجاه المطلق للف النظائرى. ومجال هيجز يقدم لنا هذه الخدمة بالرغم من أنه مجال غير متجهى، وله قيمة فقط وليس اتجاه فى أى نقطة من الفراغ.

كان تأثير ذلك كبيراً على البوزونات المتجهة. هناك أربعة بوزونات غير متجهة مطلوبة لنظرية المجال. وكما علمنا فإن نظرية ينج - ميلز تتطلب ثلاثة بوزونات متجهة ليست لها كتلة. وعند دمج النموذجين معًا، فإن ثلاثة من بوزونات هيجز مع الثلاث بوزونات المتجهة تندمج معًا - طبقًا للتعبير المستخدم بواسطة عبد السلام. وكل بوزون متجهى "يأكل" أحد جسيمات هيجز، وعندما يحدث هذا، فإن البوزونات المتجهة تكتسب كتلة ولفًا متناسبًا مع اللف الأصلى لبوزونات هيجز. بدلاً من أن يكون لدينا ثلاثة بوزونات متجهة لا كتلة لها، وأربعة جسيمات هيجز تتطلب النظرية ثلاثة بوزونات متجهة لها كتلة ويمكن ملاحظتها بالإضافة إلى بوزون هيجز لا متجهى وله أيضًا كتلة كبيرة، ولكن كتلته لم يمكن تحديدها من النظرية. يكسر مجال هيجز التماثل الموجود بالطريقة المناسبة تمامًا طبقًا لما نلاحظه، وذلك مقابل بوزون إضافى لم يمكن ملاحظته. كما تظهر الكتلة بطريقة طبيعية فى كل تنويعات ينج - ميلز.

كان هيجز نفسه يعمل فى إطار المجال النووى الشديد. ولكن أفكاره سرعان ما اقتبست لتطوير نظرية الكهربية - الضعيفة. كانت الإشارة الأولى من ستيفن واينبرج عام ١٩٦٧. كان واينبرج معاصراً تماماً لجلاشو على الرغم من أنه يصغره بنحو ستة أشهر (حيث ولد فى مايو ١٩٣٣) وكانا معا فى مدرسة برونكس الثانوية. حيث أنهياها عام ١٩٥٠ ثم أنهيا دراستهما بجامعة كورنل عام ١٩٥٤. وبعد ذلك افترقت بهم الطرق وانتهى واينبرج إلى نموذج رياضى مشابه لنموذج جلاشو لتفسير الكهربية - الضعيفة، ولكن مع الاستفادة من نموذج هيجز. بحلول عام ١٩٦٠ كان قد وصل إلى جامعة بيركلى حيث استمر حتى عام ١٩٦٩ ثم انتقل إلى MIT ثم إلى هارفارد عام ١٩٧٣. لقد كان أسلوب واينبرج فى معالجة توحيد القوى الكهربية - الضعيفة أسلوبًا خاصًا به ولكن بطبيعة الحال ينبع من نفس الخلفية والتعليم مثل جلاشو و عبد السلام.

يرجع اهتمامه بالقوى النووية الضعيفة إلى أيام دراسته للدكتوراه فى برينستون. وفى عام ١٩٦٠ عمل بجد فى اتجاه الحصول على نموذج مشابه لآلية هيجز، ولكن بطريقته الخاصة. ثم نشر بحوثه الخاصة بمجال القوة الكهربية - الضعيفة والتى تشتمل على تعيين كتل البوزونات المتجهة من خلال الكسر التلقائى للتماثل عام ١٩٦٧[٤].

عرف عبد السلام بنموذج هيجز من زميل له فى الأمبريال كولدج قبل شهور من نشر هذه الأبحاث. أعاد عبد السلام صياغة النموذج الذى نشره مع وارد وأضاف إليه نموذج هيجز مما أعطى تقريبًا بصفة أساسية ذات النموذج الذى صاغه واينبرج، حيث تظهر الآن كتل البوزونات بطريقة طبيعية ثم قام بإعطاء عدة محاضرات عن النموذج الجديد فى الأمبريال كولدج عام ١٩٦٧، وأعقبه محاضرة فى مؤتمر نوبل مايو ١٩٦٨ حيث نشرت فى مطبوعات المؤتمر.

فى الوقت المناسب حصل كل من جلاشو وعبد السلام و واينبرج مناصفة على جائزة نوبل فى الفيزياء لإسهاماتهم فى الوصول إلى نظرية موحدة للمجال الكهربى - النووى الضعيف. وهى خطوة تعادل عمل ماكسويل للحصول على نظرية موحدة للمجال الكهرومغناطيسى منذ قرن سابق[٥]. ولكن الوقت المناسب لم يحن إلا فى عام ١٩٧٩ . لقد تطلب الأمر وقتا حتى يدرك الفيزيائيون النظريون أهمية نظرية عبد السلام - واينبرج؛ لأنه فى عام ١٩٧١ أوضح الفيزيائى الهولندى جيراد تهوفت أن هذا النموذج لنظرية المجال الكهربية - الضعيفة قابل لإعادة التسوية[*]. ثم فى عام ١٩٧٣ قدمت التجارب فى CERN الدليل الذى يثبت التفاعلات المتعادلة التى تنبأت بها النظرية،

(٤) نشرت فى مجلة Physical Review Letters نهاية عام ١٩٦٧، Volume 19 page 1264.

(٥) لا تسكب دموعًا كثيرة على ينج لأنه لم يشارك فى الحصول على جائزة نوبل عام ١٩٧٩ فقد سبق له المشاركة فى الجائزة عام ١٩٥٧ لإسهام محورى فى فيزياء الجسيمات، والتى أدت إلى قصة بداية الكون كما شرحنا سابقًا.

(*) إعادة التسوية بمعنى renormalizable أى أن مشكلة اللانهاية لا تظهر بها كما أورد المؤلف فى الفصل السابق.

وهى التفاعلات التى تتوسط فيها جسيمات Z المتعادلة. لقد كانت إعادة تسوية النظرية المقياسية للمجال، والتى أثبتها تهوفت هى التى أدت إلى الانطلاق الكبير لنظرية المجال فى السبعينيات والتى أدت إلى نظرية للتفاعلات الشديدة، وكذلك لفهم ما جرى فى اللحظات الأولى لبداية الكون.

نضوج نظرية المجال المقياسى

قد تبدو الطريقة التى عرضنا بها قصة النظريات المقياسية خلال الخمسينيات والستينات منطقية ومنظمة وسلسة وتدل على مسار منظم للتقدم العلمى، وهذا صحيح إلى حد ما. إن الطريق الذى اتبعه واينبرج وعبد السلام وآخرين فى الستينيات كان طريقا فرعيًا فى التقدم العلمى. لقد كان العلماء النظريون الذين تناولوا موضوعات مثل النظريات المقياسية اللاتبادلية - كانوا رياضيين أكثر ما كانوا فيزيائيين. فقد كان اهتمامهم منصبًا على المعادلات والتماثل من الناحية الرياضية أكثر من أى معنى يحملونه للعالم الحقيقى. ونحن الآن بعد كل هذا التقدم العلمى والنظريات المختلفة نستطيع أن ننظر للخلف منذ البداية، ونتبين الخيط المهم الذى يربط منظومة العلم والذى سوف يقود إلى أشياء أكبر. وقد ظهر هذا جليًا بالطريقة التى أهملت بها بحوث واينبرج والتى نشرت عام ١٩٦٧ حول نظرية توحيد المجال الكهربى - النووى الضعيف حيث أهملت لمدة أربع سنوات كاملة.

إن أهمية أى بحث علمى منشور فى مجلة متخصصة (كما حدث مع بحث واينبرج)[٦] تظهر فى مجلة تسمى *الفهرس المرجعى العلمى*؛ حيث تحصى كل عام عدد البحوث التى أشارت له، والتى نشرت أيضًا فى مجلات متخصصة. لقد مضى عام ١٩٦٧ ثم عام ١٩٦٨ و ١٩٦٩ دون أن يشير أحد إلى بحث واينبرج ولا حتى واينبرج نفسه وفى عام ١٩٧٠ أشار بحث واحد إليه ثم أربعة عام ١٩٧١، ثم ستة عام ١٩٧٢ وفى عام ١٩٧٣ قفز العدد إلى ١٦٤[٧].

---

(٦) Scientific Citation Index.

(٧) الأرقام مأخوذة من: Pickering page 172.

ولقد جذب بحث تهوفت الأنظار إلى نظرية واينبرج عام ١٩٧١ عندما بين أن النظريات المقياسية ومنها الكهربية - الضعيفة على وجه الخصوص يمكن إعادة تسويتها. لقد كان التقدم بطيئًا جدًا ومضنيًا، وليس هنا مجال سرد كل الطرق المسدودة التى سارت فيها البحوث. ولذا فمرة أخرى قد تبدو القصة مباشرة وغير معقدة، ولكن تذكر مرة أخرى أن هذا؛ لأننا نملك الآن معرفة الطريق السليم.

الخيط الذى يربط أجزاء القصة بدأ مع أبحاث فيزيائى هولندى آخر هو مارتن فيلتمان المولود عام ١٩٣١، وقد درس فى جامعة أوتريشت ثم أمضى خمس سنوات فى CERN قبل أن يحصل على وظيفة أستاذ الفيزياء فى جامعته الأصلية. طور فيلتمان بنفسه بطريقة ملفتة مجموعة من المعادلات المقياسية التى تناظر نموذج ينج - ميلز للمجالات. وقد أدت مناقشاته مع ريتشارد فينمان إلى ارتباكه، حيث اقترح فينمان أسلوبًا مختلفًا لمعالجة مسائل الفيزياء الجسيمية. ولكنه قرر فى نهاية الأمر اتباع اقتراح آخر للعالم جون بل وهو فيزيائى إنجليزى يعمل فى CERN بأن أفضل الطرق هو المضى قدما فى تطوير نظرية مماثلة لنموذج ينج - ميلز للتفاعلات النووية الضعيفة. لقد تناول المسألة بطريقته الخاصة جدًا من خلال طريقة تكامل المسار والتى ابتكرها فينمان، ولكن قليل جدًا من الفيزيائيين يفضلونها كأداة عملية.

المشكلة الرئيسية لجميع النماذج المشابهة لنموذج ينج - ميلز هى الطريقة التى تظهر بها اللانهاية، والتى لا يمكن تلاشيها. حتى أواسط الستينيات من القرن العشرين كان يبدو أنه لا مخرج من هذا المأزق؛ حيث كانت جميع النظريات من ناحية المبدأ غير قابلة لإعادة التسوية. ولكن مع ظهور الحاسبات الآلية و قيامها بأدوار مهمة فى مثل هذه البحوث فى الستينيات تمكن فيلتمان من التعرف إلى عدة طرق يمكن بها تلاشى عدد من اللانهايات مما يظهر أنه قد يمكن فى نهاية الأمر إعادة تسوية النظرية بالكامل. ولقد أمضى عدة سنوات فى تهيئة الأرضية لذلك ومعالجة العديد من المسائل وحلها ولكنه أبدًا لم يصل إلى إعادة تسوية النظرية بنفسه. إن هذا العمل قام به شخص آخر حمل الشعلة من بعده.

جيرارد تهوفت المولود فى هولندا عام ١٩٤٦، وكان قد التحق أيضًا بجامعة أوتريشت كطالب عام ١٩٦٤ ثم كباحث للحصول على درجة الدكتوراه تحت إشراف فيلتمان عام ١٩٦٩ . المسائل التى اختار أن يدرسها والطرق التى اتبعها فى حلها كانت بعيدة عن المسار المعتاد للعلم. فقد بدأ فى اختيار دراسة النظريات المقياسية التى لم تعد تصبح فى ذلك الوقت الموضوع الساخن على الساحة. ثم تحت قيادة فيلتمان اختار بعد ذلك أن يعالج النظريات المقياسية بطريقة فيلتمان فى تكامل المسارات، مستعينًا بعدد من طرق ووسائل فيلتمان. استطاع تهوفت فى بحث منشور عام ١٩٧١ أن يبين أن النظريات المقياسية عديمة الكتلة يمكن بالفعل إعادة تسويتها. وكان هذا إنجازًا عظيمًا لطالب فى بداية مشواره العلمى. ولكن ظل التحدى الأساسى هو فى إعادة تسوية النظريات التى تشتمل على جسيمات لها كتلة مثل جسيمات W و Z وهى البوزنات المتجهة التى تلعب دورًا وسيطًا فى التفاعلات النووية الضعيفة. بعد فترة أخبر فيلتمان بيكرينج عن محادثة دارت بينه وبين تهوفت فى بداية عام ١٩٧١، وهى مناقشة صادمة لدرجة أنها حفرت فى ذاكرة بيكرنج وظل يتذكرها حرفيًا لمدة عشر سنوات بعدها. وترجمة هذه المحادثة كما يلى:

"فيلتمان: بغض النظر عن ماهى وكيف الحصول عليها، فإنه من المحتم الحصول على نظرية واحدة على الأقل قابلة لإعادة التسوية وتشمل بوزونات متجهة ومشحونة وثقيلة، وحتى إذا لم تكن الطبيعة مهتمة بها إلا أن التفاصيل يمكن معالجتها لاحقًا.

تهوفت: أنا أستطيع القيام بهذا.

فيلتمان: ماذا قلت؟

تهوفت: أستطيع القيام بهذا

فيلتمان: إذن اكتبها وسوف نرى"[8].

---

(٨) مترجم من الإنجليزية عن الأصل الهولندى الذى يمكن الرجوع إليه Pickering page 178.

وبالفعل كتبها تهوفت ورأى فيلتمان أن تهوفت بالفعل تغلب على المشكلة وقد نشر هذا البحث عام ١٩٧١(*) وحصل تهوفت على درجة الدكتوراه فى مارس ١٩٧٢ . منذ ذلك الحين عادت النظريات المقياسية وفيزياء الجسيمات الأولية لتحتل مكانها مجدداً فى صدارة البحوث وذلك بفضل طالب مغمور قام بدراسة مشكلة مهجورة بوسائل غير مفضلة، وقد نقل هذا إلى الولايات المتحدة الفيزيائى بنيامين لى، والذى كان فى زيارة لجامعة أوتريشت فى صيف ١٩٧١ وعاد إلى الولايات المتحدة ومعه نسخ من بحث تهوفت المنشور فى ١٩٧١ . أكد لى سلامة بحوث تهوفت وقام بإعادة صياغتها فى لغة رياضية تقليدية فى بحث له نشر عام ١٩٧٢ . لقد كانت بحوث لى هى التى أقنعت فيزيائيين من أمثال واينبرج لأخذ الموضوع على محمل الجد وأقنعتهم بأن النظريات المقياسية للتفاعلات الضعيفة تحتوى على كسر للتماثل، وبالتالى الحصول على كتلة البوزونات من خلال نموذج هيجز، هى بالفعل نظريات قابلة لإعادة التسوية. وهكذا نضجت النظرية المقياسية على الأقل من وجهة نظر الفيزيائيين النظريين.

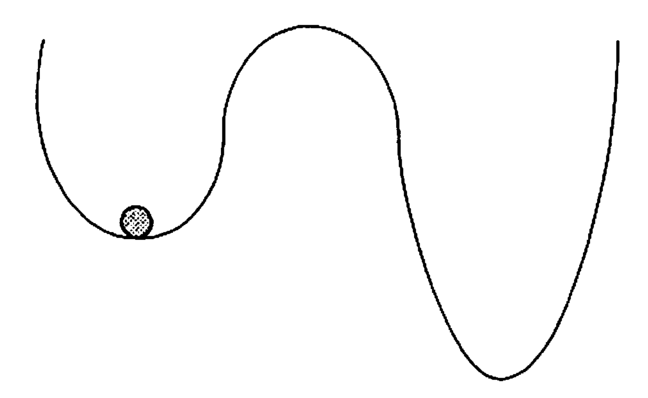
قادت التجارب التى أجريت فى CERN عام ١٩٧٣، والتى تضمنت تصادم عدد من النيوترينو فى غرفة فقاعية هائلة تسمى جارجاميل (Gargamelle) إلى الدليل المادى لوجود تفاعلات تشمل الجسيمات Z المراوغة. أظهرت المسارات فى الغرفة الفقاعية أن النيوترينو أو مضاد النيوترنيو يمكن أن يتفاعل مع إلكترون تماماً كما تنبأت النظرية الكهربية - النووية الضعيفة بواسطة الجسيم Z المتعادل (لأنه لا يوجد انتقال للشحنات ويسمى هذا تفاعل التيار المتعادل). كما أظهرت التجارب التالية سلامة هذا التفسير للأحداث. بعد فحص ثلاثة ملايين صورة لما يحدث داخل جارجاميل،

(*) Nuclear physics volume B35 page 167.

وجد الفيزيائيون ١٦٦ تفاعلاً يمكن تفسيرها بواسطة "التيار المتعادل". الآن أصبح العلماء التجريبيون مقتنعين بأن النظرية المقياسية للقوى الكهربية - الضعيفة هى أفضل نظرية لتفسير التفاعلات التى تحدث بين اللبتونات والفوتونات.

هذه الاكتشافات كانت من الأهمية كما كان تزامنها مع اكتشاف تهوفت طريقة إعادة التسوية للنظرية الكهربية - الضعيفة مما أدى إلى فوز كل من واينبرج وعبد السلام وجلاشو بجائزة نوبل عام ١٩٧٩ حتى مع عدم وجود تأكيد عملى على وجود جسيمات W و Z حتى ذلك الوقت. ولكن النظرية تنبأت بوجود هذه الجسيمات كما حددت أيضًا كتلها. جسيم W يجب أن تكون كتلته حوالى ٩٢ جيجا إلكترون فولت أى أثقل مئة مرة من البروتون كما أن جسيم Z يجب أن تكون كتلته حوالى ٨٢ جيجا إلكترون فولت . حتى يمكن إيجاد هذه الجسيمات وملاحظتها أثناء تحللها يجب أن تحصل على معجل جسيمات يمكنه إكساب الجسيمات هذه الطاقة الهائلة. وقد بنى مصادم البروتونات ضد البروتونات فى جنيف بواسطة CERN لإحداث تصادم بين سيل من البروتونات مع سيل من مضاد البروتونات. وفى الأشهر الأولى من عام ١٩٨٣ فقد قدم هذا المعجل أدلة قوية على وجود الجسيمات W و Z وكتلها كانت قريبة جدًا مما تنبأت به النظرية. ويتم إنتاج هذه الجسيمات فى بداية التفاعل، ثم سرعان ما تتحول إلى إلكترونات وجسيمات أخرى(٩) ولاشك أن هذه الاكتشافات أثلجت صدر لجنة نوبل حيث أظهرت أن الأساس الذى منحت عليه الجائزة عام ١٩٧٩ كان سليما. وسريعًا قاموا بمنح الجائزة لعام ١٩٨٤ فى الفيزياء للعالم التجريبى كارلو روبيا رئيس الفريق الذى قام بهذا العمل فى CERN.

(٩) تفاصيل التجارب على هذه الجسيمات يمكن الحصول عليها فى كتاب The particle connection by Christine Sutton والذى يشرح كيف يمكن تحقيق هذه التصادمات العالية الطاقة جدًا هى فى حد ذاتها ، كما يشرح الملاحظات وتفسيرها.



شكل (٣-٢) الطبيعة ليست دائمًا متماثلة. فى هذه الحالة الوضع ليس متماثلاً حتى مع عدم وجود الكرة (انظر شكل ٢-٧). الآن يمكن للكرة أن تتواجد فى حالة أقل طاقة (محليًا فقط)، ولكنها ليست فى أقصى حالات الثبات، ولكنها أقرب إلى حالة جسيم ألفا فى نواة غير مستقرة (شكل ١-٤). عندما تكون طاقة الكرة عالية أعلى بكثيرة من طاقة الواديين، فإن عدم التماثل لا يكون موجوداً، ولكن فى حالة انخفاض مستوى طاقة الكرة، فإن الكرة عليها أن تختار بين حالتين. وفى الحالة الموضحة بالشكل أعلاه فإن الكرة سوف تخترق إلى المستوى الأقل طاقة (نظرية النفق).

إن أهمية هذه الكتل فى توحيد القوى فى الانفجار الكونى العظيم من السهل ملاحظتها. عندما كانت كثافة الطاقة (الحرارة) فى الكون عالية جدًا بدرجة كافية، فإن جسيمات بكتل أقل من ١٠٠ جيجا إلكترون فولت كانت تظهر بطريقة تلقائية فى ثنائيات جسيمات و مضاداتها. إذن بدلاً من أن يظهر جسيم حامل للقوى النووية الضعيفة الوجود فترة زمنية قصيرة تسمح بها قوانين اللاحتمية، فإن الطاقات المحيطة به تسمح أن تتحول هذه الجسيمات إلى جسيمات حقيقية وتمنحها وجودًا ما متجددًا. طالما أن كتلة الجسيم أقل من الطاقة المتاحة سيظل الجسيم إلى ما لانهاية مثل الفوتون، وتذوب الفوارق بين الفوتونات وجسيمات W و Z. مع طاقات عالية جدًا فى بداية مراحل الانفجار الكونى العظيم لا يكون هناك فارق بين القوى الكهرومغناطيسية والقوى النووية الضعيفة. أما نحن فنلاحظ الآن هذا الفارق؛ لأن الكون أصبح باردًا حيث التماثل لم يعد موجودًا. تبدأ جسيمات W و Z فى البرودة عندما تصل درجة حرارة

الكون ١٠^١٥ درجة كلفن، وذلك بعد واحد على ألف مليون جزء من الثانية بعد لحظة الانفجار العظيم (نشأة الكون). وعند تلك اللحظة تبدأ القوى النووية الضعيفة والكهرومغناطيسية فى الافتراق والاختلاف عن بعضهما وتسلكان طريقين مختلفين إلى أن استطاع الإنسان أن يعيد هذه اللحظة ثانية على مستوى صغير جداً، وفى جزء ضئيل من الثانية، وفى حيز ضئيل جداً داخل ماكينة ضخمة بالقرب من جنيف؛ حيث أعاد تهيئة الظروف التى سادت الكون بعد واحد على ألف مليون جزء من الثانية بعد لحظة الانفجار الكونى العظيم.

بحلول عام ١٩٨٥ تمكن العلماء من الحصول على طاقات تصل إلى ٩٠ جيجا إلكترون فولت فى جهاز تصادم البروتون ومضاد البروتون فى CERN، وهذا رقم عالمى قياسى. ومع نهاية الثمانينات أصبح إنتاج هذه البوزونات المتجهة الوسيطة أمراً عادياً. ولكن ليس فى المنظور الوصول إلى نجاح مماثل لإنتاج الجسيمات المطلوبة للنظريات الأعلى درجة فى توحيد القوى الطبيعية. إن النظريات الحديثة التى بنيت على نجاحات نظرية المجال الكهربى - النووى الضعيف المقياسية تخبرنا بأن كتل هذه الجسيمات أكبر بكثير جداً من الطاقة التى تتيحها المعجلات التى يمكن للإنسان تصنيعها فى المستقبل المنظور. إن المكان الوحيد الذى كانت هذه الطاقات متاحة فيه هو فى لحظات الانفجار الكونى العظيم. وعلى هذا أصبح الكون هو معمل اختبار الأفكار الحديثة فى فيزياء الجسيمات الأولية. وهذه الأفكار تدين بالكثير لنظريات الكهرومغناطيسية والقوى النووية الضعيفة التى سبقتها.

الكوارك ذات الألوان

حتى منتصف الستينيات من القرن العشرين كان يوجد فصيلتان من اللبتونات المعروفة، كل منهما تتكون من جسيم شبيه بالإلكترون ونيوترينو مصاحب له. هذه الأزواج هى الإلكترون والنيوترينو الخاص به، والميون والنيوترينو الخاص به. عندما ظهرت فكرة الكوارك كان هناك حاجة لثلاثة أنواع من الكوارك فقط لوصف جميع الجسيمات.

الكوارك "الأعلى" و"الأسفل" يشكلان زوجًا، ثم الكوارك "الغريب" فقط وحده. فى الحقيقة تنبأ جيل - مان فى بحثه الخاص بالكوارك بضرورة وجود كوارك رابع ليكون مع الكوارك الغريب زوجًا حتى تصبح اللبتونات زوجين والكوارك زوجين. ولكن سرعان ما أهملت الفكرة لعدم وجود أى دليل على وجود جسيمات يدخل فى تركيبها الكوارك المفترض. كيف يمكن لثلاثة كوارك متطابقة أن تتواجد معًا فى نفس الحالة لتكون جسيمًا مثل جسيم أوميجا؟ كان هذا السؤال مؤرقًا وامتص مجهودًا كبيرًا من عدد من العلماء المهتمين بنظرية الكوارك فى منتصف وحتى نهاية الستينيات وذلك قبل أن تنهار النظرية.

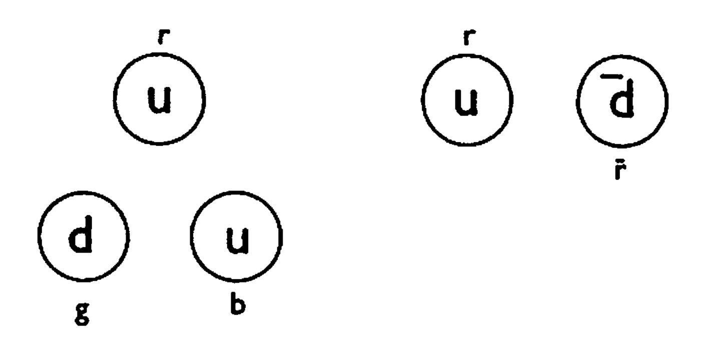
والتر جرينبرج عالم فيزياء نظرى يعمل فى جامعة مريلاند كان سعيدًا بفكرة الكوارك حينما ظهرت للوجود عام ١٩٦٤؛ لأنها زودته بتطبيقات عملية لأفكار حول نظرية مجال كان يعمل على صياغتها منذ عدة سنوات. كان جرينبرج يعمل أساسًا لتطوير نظرية مجال بطريقة رياضية دون النظر للتطبيقات العملية. ولكن إحدى الأفكار النظرية وتسمى "الإحصاء الموازى"(*) أصبحت ذات قيمة مع المسائل المتعلقة بالكوارك، وبسرعة قام جرينبرج بتطبيق أفكاره المجردة على نموذج الهادرونات الجديدة، وخرج بالعديد من النتائج المثيرة للفضول. ومع أن طريقته كانت تقنية أكثر من اللازم فإنها أثارت احتمال وجود أنواع مختلفة من "الكوارك الموازية" والتى تخضع لمبادئ "الإحصاء الموازى" وعلى هذا، فإن الثلاثة كوارك المتطابقة، والتى تكون جسيم أوميجا وهادرونات أخرى من الممكن التمييز بينها بالاستعانة بخاصية مؤكدة تظهر فى الثلاثة أنواع. هذه الفكرة سرعان ما التقطها كل من يوشيرو نامبو من جامعة شيكاغو و م. ى . هان من جامعة سيراكوزا. فقد عملا سويا عام ١٩٦٥ لتطوير أفكار جرينبرج بأسلوب متجذر مع العالم الواقعى والتجارب العملية، وبالتالى أصبحت أكثر قبولاً لدى الفيزيائيين من رياضيات "الإحصاء الموازى" البديعة.

(*) "Para statistics".

الفكرة وراء كل هذا العمل هى أن كل من الكوارك المعروفة يمكن أن تأخذ أحد ثلاثة "ألوان". اصطلاح "ألوان" هنا ليس أكثر من مجرد تسمية فقط مثل الأسماء "أعلى" "أسفل". ولكنها تجعلنا نفرق بين كوارك "أعلى أحمر" وكوارك " أعلى أزرق" وكذلك بين كوارك "أعلى أحمر" وكوارك "أسفل أحمر". توضح لنا المعادلات الرياضية كيف يتفاعل ثلاثة أنواع من الكوارك بطريقة دقيقة وببراعة. ولكن لب ما تخبرنا به المعادلات يمكن فهمه من خلال الألوان فى ضوء ما تقوله المعادلات. الجسيم أوميجا على سبيل المثال يمكن أن يتركب من ثلاثة كوارك غريبة، ولها نفس اللف، ولكن ذات ألوان مختلفة "أزرق" "أحمر" "أخضر" وعلى هذا فهى مميزة وليست متطابقة، وبالتالى يمكن وجودها معًا. الألوان هى طريقة مساعدة للتذكر ولمساعدة العقل على الفهم. ولكن الفيزيائيين الرياضيين يؤكدون لنا أن الصورة التخيلية من هذا التناظر ليست مضللة.

هذا ما يبدو الآن، ولكن رجوعًا إلى عام ١٩٦٥ فقد اعتبر هذا الأسلوب مجرد حيلة لا معنى لها. قام كل من نامبو وهان بتعكير صفو المياه بالعمل على اشتمال ثلاثيات من الكوارك فى نموذجهم فى محاولة لتجنب تجزئة الشحنة الكهربية، ولكن حيث إن القليل جدًا أبدى اهتمام بنظرية الكوارك فى هذا الوقت، فلم تثر هذه الأعمال أى اهتمام. ولكن هذه الأفكار قد أنارت الطريق لفهم تصرفات الكوارك مثل لغز لماذا تأتى الكوارك فى ثلاثيات أحيانًا (مثل الباريونات) وأحيانًا أخرى أزواجًا (مثل الميزونات)؟. بمجرد وضع قاعدة بأن التوليفات المسموح بها للكوارك يجب أن تكون فى النهاية لا لون لها. استطاع نامبو أن يوضح لنا لماذا تنقسم الهادرونات إلى هذين النوعين. كل ميزون يتكون من كوارك ذى لون معين ومضاد للكوارك من أى نوع، ولكن يحمل ضد اللون فيمكن للكوارك "أعلى أحمر" أن يوجد مع مضاد للكوارك "أعلى أحمر" أو مضاد للكوارك "أسفل أحمر" أو مضاد كوارك "غريب أحمر" فى أى من هذه الحالات، فإن اللون ومضاد اللون يلاشيان بعضهما بالمعنى الرياضى للكلمة. والطريقة الأخرى للحصول على حالة متعادلة وكما أوضح عن طريق مزج كل من هذه الألوان فى الجسيم كوارك "أحمر" كوارك "أخضر" وكوراك "أزرق"، وكل منها يمكن أن يكون من أى نوع

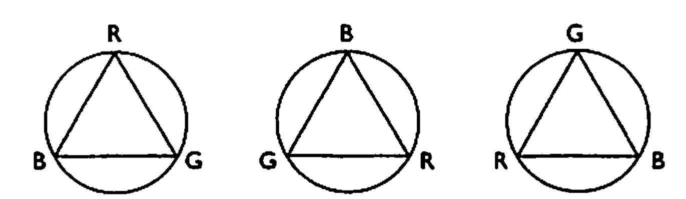
"أعلى - أسفل - غريب". كما أن ثلاثة مضادات كوارك مختلفة الألوان يمكن لها عمل نفس الشيء. ولكن كوراك واحد أو مجموعات من أربعة كوارك سوف يكون لها لون في النهاية وهو ما يبدو غير مسموح به.



شكل (٣-٢) ثلاثة كوارك يمكنها تركيب جسيم باريون (في هذه الحالة بروتون) مع الأخذ في الاعتبار أن كلاً منهم له لون مختلف . أما زوج كوارك ومضاد للكوارك فيمكن تركيب جسيم "بيون" في ضرورة أن لون الكوارك يتلاشى بواسطة مضاد اللون في مضاد الكوارك. مضاد الكوارك يشار إليه بشرطة فوق الرمز.

بحلول عام ١٩٧٠ مالت نتائج التجارب إلى ما يشبه أن يكون متماشياً مع نظرية ألوان الكوارك وبدأت الفكرة في الانتشار. وفي نفس الوقت قام جلاشو واثنان من زملائه في هارفارد، وهما جون اليوبولوس ولوشيانو مایانی بإحياء فكرة وجود كوارك رابع وقد أعطاه جلاشو اسم "فاتن" "Charm" وذلك في محاولة لترتيب التفسير النظرى لبعض الملاحظات العملية الصعبة. في عام ١٩٧١ قام كل من موارى جيل-مان وهيرالد فريتز المولود في زيوريخ عام ١٩٤٣، وهو الآن أستاذ باحث في الفيزياء في معهد ماكس بلانك للفيزياء في ميونخ باعتماد فكرة الألوان لتطوير نظرية مجال لشرح تصرف التفاعلات التي تشمل جسيمات تتأتى في ثلاثة أنواع. في خريف ١٩٧٢ أوضح جيل - مان و فريتز أن أفضل وصف لتركيب الهادرونات هو من خلال نظرية مجال

مقياسية مشابهة لنموذج ينج - ميلز، وفيها تتفاعل الكوارك الثلاثية الألوان مع بعضها من خلال لواصق (gluons) ثمانية الأوجه. إن التماثل أصبح معقداً، والأعداد تتزايد، ولكن الفكرة الأساسية واحدة مشابهة للنظرية الناجحة للقوى الكهربية - النووية الضعيفة وQED.



شكل (٣-٤) لون كل كوارك يمكن تخيله على أنه مفتاح نو ثلاثة أوضاع والذى يقوم بإدارة مؤشر داخلى مناظر لسهم اللف النظائرى الذى يميز البروتون من النيوترون.

مرة ثانية الفكرة الأساسية تفهم من خلال التماثل. فلنتخيل الآن أن كل باريون يحتوى على ثلاثة كوارك، وكل كوارك له آلية لاختيار اللون - مؤشر داخلى مثل متجه اللف النظائرى الذى له وضعان كما سبق، ولكن هناك ثلاثة أوضاع تناظر الألوان الثلاثة. التحويل المتماثل المقياسى العالمى هو تحويل يقوم بإدارة كل مؤشر بزاوية قدرها ١٢٠° فى اتجاه عقارب الساعة، وعلى هذا يقوم بتغيير لون كل كوارك، ولكن تظل قوانين الفيزياء بدون تغيير. أما التحويل الموضعى المقياسى فسوف يغير موضع المؤشر (اللون) لكوارك واحد فقط داخل الباريون، ولا يغير باقى العالم. والطريقة لاستعادة التماثل بعد التحويل الموضعى (كما سبق شرحه) هى بإضافة مجالات تناظر فى هذه الحالة الثمانى لواصق (gluons) والتى لا كتل لها جميعها (فى الطرح الأول للنظرية) ولها لف مقداره الوحدة لبوزون متجهى يناظر الفوتون.

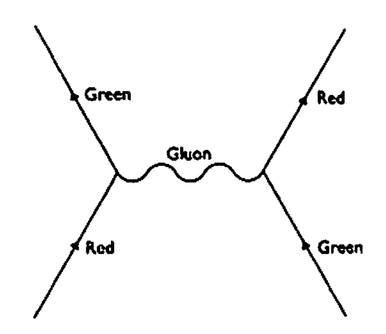
عرفت هذه النظرية بنظرية الكم(*) اللونية الديناميكية (ك ل د) (QCD) وهو اسم اختاره جيل - مان مستوحياً اسم نظرية الكم الكهروديناميكية (ك ل د) QED

(*) Quantum Chromo Dynamics QCD.

وتقول النظرية أن أى كوارك يمكنه تغيير لونه مستقلاً عن جميع الكوارك الأخرى ويتم ذلك بإطلاق جسيم لاصق (gluon) والذى يتم امتصاصه بواسطة كوارك آخر وينتج عن ذلك تغيير لون الكوارك الأخير بطريقة تلاشى التغيير الذى حدث فى الكوارك الأول وبالتالى يظل الهادرون لا لون له. جميع الهادرونات لا لون لها حتى إذا ما قامت الكوارك المكونة لها بتغيير ألوانها كل لحظة. ولأن اللواصق (gluons) تحمل ألوان فهى تتصرف بطريقة مختلفة عن الفوتونات التى لا شحنة لها وتتفاعل مع بعضها البعض. اللواصق تتفاعل مع بعضها حتى أثناء نقلها القوة من كوارك إلى آخر. ولعل أعجب نتيجة لهذا أنه بالرغم من أن القوة النووية الشديدة تضعف قوتها على المسافات الصغيرة (داخل البروتون مثلاً) إلا أن التفاعل بين اللواصق يجعل هذه القوة أقوى على المسافات الأبعد (على مسافة $١٠^{-١٣}$ سم) وتصبح قوية بدرجة كافية لربط البروتونات معًا بالرغم من التنافر الكهربى بين شحناتها الكهربية الموجبة. ويمكن تشبيه ذلك بالشريط المطاطى المشدود يربط بين كوركين وكلما حاولت أبعادهما عن بعضهما يتزايد الشد فى الشريط المطاطى وتزيد القوة التى يجذب بها الكوركين إلى وضعهما الأصلى. فى هذه الحالة الشريط المطاطى هو سيل من اللواصق يتم تبادلهم بين الكوركين.

وإذا عدنا للمثال السابق فإذا زادت القوة التى تريد فصل الكوركين عن بعضهما زيادة كبيرة (هذا يعنى إضافة طاقات عالية إلى التصادم) فإنه فى لحظة ما ينقطع الشريط المطاطى. ولكن لن نحصل على كورك حر كما قد نتوقع. إن ما يحدث هو شبيه بعملية إحضار قضيب مغناطيسى ثم نقوم بكسره فلن نحصل على قطب مغناطيسى مفرد ولكن سوف يتولد فى مكان الكسر قطبان متضادان بحيث نحصل على مغناطيسين. إذن ما يحدث هنا أنه سوف تتحول طاقة قوى الربط بين الكوركين إلى خلق كوركين جديدين فى مكان الكسر تمامًا كما فى حالة المغناطيس المكسور. وبدلاً من خروج كوارك حر فإنه سوف يخرج على الأقل اثنان مربوطان بسيل من اللواصق وهذا هو الميزون. ولأن اللواصق تحمل ألوانا فهى أيضًا مجبرة على التحرك فى مجموعات تمامًا مثل الكوارك ولا تتواجد منفردة أبدًا ولهذا فإنه من المفترض ألا يتم اكتشاف لاصق منفرد أبدًا. وبالرغم من أن اللواصق لا كتلة لها إلا أنها لا يمكنها

الانتشار مثل الفوتونات. قد يمكن تتبع مجموعات لا لون لها من اللواصق (كرات لاصقة) فى التجارب مثل التى تجرى فى CERN(١٠).



شكل ٣-٥ التفاعل بين كواركين عن طريق تبادل لاصق بينهما يمكن أيضًا تمثيله على مخطط فينمان.

لقد حدث تغيير فى مسار الفيزياء فى السبعينيات وتحديداً عام ١٩٧٤ عندما قام فريق يعمل فى جامعة ستانفورد، وكذلك أحد العاملين فى معمل بروكهافن القومى فى لونج آيلاند اكتشف كل منهما مستقلا ومتزامنين تقريباً دلالات على وجود جسيم ثقيل آخر يطلق عليه الآن (ابساى) Psi. وكان أفضل تفسير له أنه جسيم يضم الكوارك الرابع "الفاتن" وهذا الاكتشاف أدى إلى منح جائزة نوبل عام ١٩٧٦ فى الفيزياء لكل من صامويل تينج رئيس فريق بروكهافن وبيرتون ريختر رئيس فريق ستانفورد. كان الاكتشاف دراميًا جداً حتى إنه يشار إليه باسم "ثورة نوفمبر" حيث تم الإعلان عنه فى نوفمبر ١٩٧٤. ويكفى العثور على جسيم "فاتن" حتى يعرف التجريبيون أين يكتشفون باقى العائلة من الجسيمات "الفاتنة". وقد أمدت هذه العائلة من الجسيمات الفيزيائيين بوسيلة لاختبار نظرية "ك ل د" "QCD" والتى بالفعل تنبأت بالعديد من خواص هذه الجسيمات الجديدة. أصبح عالم الجسيمات فى حالة أفضل جداً بعد اكتشاف أربعة كوارك وأربعة ليتونات. ولكن بقيت خطوة واحدة أخيرة.

(١٠) هناك ادعاءات أن هذه الكرات اللاصقة قد شوهدت فى CERN حديثًا، ولكن لم يتم تأكيد ذلك حتى الآن.

أوضحت التجارب فى معجل ستانفورد الخطى عام ١٩٧٥ أنه ربما يكون هناك جسيم آخر من عائلة اللبتونات، ولكنه أثقل من البروتون مرتين وقد سمى "تاو" "Tau"، وقد تم التأكد من ذلك فى هامبورج بعد عام واحد. لقد كان من المفترض (وتوجد أدلة قوية تدعم هذا الفرض) أنه لابد من وجود نيوترينو مناظر للجسيم "تاو" مما يجعل عدد اللبتونات ستة تأتى فى ثلاثة أزواج. ولهذا جادل النظريون فى أنه لابد من وجود كواركين آخرين حتى يعود التماثل. وسمى هذان الكواركان "قمة" "وقاع" وقد أمكن تحديد الكوارك "قاع" عام ١٩٧٧ أما البحث عن الكوارك "قمة" فقد استمر حتى عام ١٩٩٤ عندما تم تمييزه من بين شظايا أحد التصادمات ذات الطاقة العالية فى معمل فيرمى لاب بالقرب من شيكاغو. ويجب أن يكون هذا هو نهاية الخيط. هناك أسباب قوية فلكية تدعو للاعتقاد بأنه لا يوجد سوى ثلاث مجموعات من أزواج اللبتونات فى الكون وقد أظهرت تجارب CERN فى نهايات الثمانينيات أن تصرف الجسيمات المعروفة عند الطاقات العالية تمنع احتمال وجود نوع رابع من النيوترينو وبالتالى تمنع وجود لبتون رابع.

كوارك		لبتونات
u	=	e^-
d	=	ν_e
c	=	μ^-
s	=	ν_μ
t	=	τ^-
b	=	ν_τ

ولكن تذكر أن كل شىء فى الكون تقريبًا كان يمكن أن يظل كما هو الآن إذا لم يكن هناك سوى كواركين الأعلى والأسفل و لبتونين الإلكترون و النيوترينو. أما الباقى فقد يبدو أنه مضاعفة غير ضرورية للمجهود. شىء واحد أو أكثر من الأشباء التى تنتج من المعادلات وتحدث فقط لأنه لا يوجد ما يمنع حدوثها.

أثبت الائتلاف بين النظرية الكهربية الضعيفة ونظرية "ك ل د" "QCD" أنه ناجح جدًا لوصف عالم الجسيمات الدقيقة لدرجة أنه أصبح يشار إليه "بالنموذج الأساسى" للفيزياء؛ ولكنه ما زال غير مكتمل حيث يجب ربط "ك ل د" مع النظرية الكهربية - الضعيفة فى إطار نظرى واحد لتصبح النظرية الموحدة الشاملة(*) "GUT" كما أن الجاذبية لم يتم إدراجها حتى الآن، ولهذا فما زال هناك الكثير؛ ما يجعل النظريين مشغولين الآن(١١) ويعتبر البحث عن التماثل الفائق هو اتجاه المجهود الرئيسى الآن واحتمالية أن كل شىء فى الكون يتكون من أوتار.

(*) Grand Unified theory.

(١١) مازال يوجد سؤال لم يتم الإجابة عليه فى نظرية QCD مع كل نجاحها حتى الآن. فمثلاً من الضرورى أن يكون للواصق كتلة من خلال آلية مماثلة لهيجز مع أن هذه المهمة مرعبة ومخيفة لأى عالم نظرى، مع العلم بأنه يوجد ثمانية لواصق يجب اعتبارها والتعامل معها فى أى نظرية متكاملة.

الفصل الرابع

البحث عن التماثل الفائق (SUSY) بدون يأس

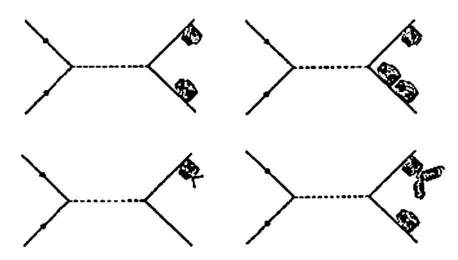
تقدم البحث عن التماثل الفائق عام ١٩٩١ خطوة مهمة إلى الأمام عندما أكملت التجارب التى أجريت فى مصادم الإلكترون - بوزيترون الهائل فى CERN(*)، بعض الفجوات (كما فى لعبة الصورة المقطعة) فى نظرية QCD، التى تعد أفضل نظرية لدينا لشرح الكوارك والقوى النووية الشديدة. وقد زادت هذه الدلائل الجدية من الثقة فى نظرية ك ل د QCD (وكنت قد وصفتها بأنها نظرية جيدة فى كتابى البحث عن الانفجار العظيم عام ١٩٨٦(**) ولكننى الآن أصفها بأنها نظرية جيدة جداً). ومع أن هذه الخطوة ليست خطوة جديدة فى الطريق إلى النظرية الموحدة لجميع القوى فى الطبيعة. فإنها تؤكد سلامة أحد الخطوات القديمة التى قطعناها، وتؤكد أنها كانت فى الطريق الصحيح للوصول إلى القوة الشاملة وهذا يؤكد للفيزيائيين أن الطريق الصحيح أمامنا هو دمج نظرية الكم اللونية الديناميكية QCD مع نظرية القوى الكهربية النووية الضعيفة، ثم مع الجاذبية.

وكما يبدو من الاسم LEP يتم إجراء تصادم بين سيل من الإلكترونات مع سيل من البوزيترونات (مضاد الإلكترون)، ومع هذه الطاقات العالية ينتج من التصادم

(*) Large Electron - Positron Collider LEP at CERN.

(**) "In Search of the Big Bang".

(كما تتنبأ النظرية) جسيمات Z والتى تتحول إلى كوارك ومضاد للكوارك. و الكوارك عالية الطاقة الناتجة سوف تنتج بدورها سيل نفثات من اللواصق (بطريقة مشابهة لتلك التى تشع بها الإلكترونات المعجلة للفوتونات) و اللواصق بدورها تولد نفثات من الهادرونات، والتى (على عكس الكوارك و اللواصق المنفصلة) يمكن كشفها بواسطة أجهزة متابعة تصادم الإلكترونات و البوزيترونات داخل LEP. والسمة المهمة التى أمكن اختبارها فى نظرية QCD بواسطة LEP هى أن اللواصق تتفاعل مع بعضها البعض فى نقطة ما، وهو الشىء الذى لا تستطيع الفوتونات عمله، وهذا كما شرحنا سابقًا هو ما يوضح الطريقة الفريدة التى تصبح بها القوة الشديدة أشد قوة كلما حاولت الكوارك الانفصال بعيداً.



شكل (٤-١) حينما يلتقى إلكترون و بوزيترون فيتلاشيان فى تصادم عالى الطاقة، فإنه قد ينتج جسيم Z (الخط المتقطع) والذى يتحول بدوره إلى كوارك ومضاد للكوارك. لا يمكن الكشف عن الكوارك و اللواصق بطريقة مباشرة، ولكن اللواصق سوف تنتج نفثات من الهادرونات يمكن الكشف عنها. إن الدليل على صحة نظرية QCD يأتى من ظاهرة "رأس اللواصق الثلاث"، والتى تم تمثيلها فى الشكل السفلى الأيمن.

والنتيجة المهمة لهذه التفاعلات وهو أنه نظريًا من الممكن فى إطار نظرية QCD أن يتم إطلاق ثلاث نفثات من اللواصق من نقطة واحدة (وبالتالى ثلاث نفثات من الهادرونات، وذلك فى مستوى التقنيات الموجودة حاليًا فى CERN) وتسمى هذه النقطة، "رأس اللواصق الثلاث". وفى نطاق المعادلات، فإن هذا يماثل نفثة واحدة من اللواصق تنقسم إلى اثنتين لينتج نفثتان من اللواصق (وبالتالى من الهادرونات). وشكل ٤-١ يمثل أحد الأمثلة. وتتنبأ QCD أنه بنسبة واحد من كل مئة تفاعل رباعى النفثات مثل الموضحة بالشكل سوف يحمل طابع "رأس اللواصق الثلاث" وهذا ما أثبتته تجارب LEP

فى ربيع وصيف ١٩٩١. مما يطابق تمامًا تنبؤات النظرية الأساسية اللاتبادلية "النموذج الأساسى" بأن ألوان الكوارك هى ثلاثة ألوان، وأن نظرية QCD تعطى وصفًا دقيقًا لتفاعلات الكوارك. كانت نظرية "النموذج الأساسى" سوف تصبح فى حالة ارتباك وفوضى إذا كانت نتائج بحوث LEP قد فشلت فى توضيح آثار "رأس اللواصق الثلاث" أو إذا لم تؤيد الإحصائيات أن عدد ألوان الكوارك ليس ثلاثة. أما والحال هكذا فإن الفيزيائيين أصبح لديهم ثقة كبيرة مما قبل بأنها هى التى ستؤدى إلى توحيد القوى الطبيعية.

فى البحث عن التماثل الفائق

ما زالت نظرية "ك ل د" "QCD" غير مكتملة كما كانت "ك أ د" "QED" منذ خمسين عامًا مضت. لقد أمكننا فقط بناء على التقدم الذى تم إحرازه فى الثمانينيات أن نلتقط الخيط الأساسى، ونحدد المسار الذى أدى إلى تقدم الفيزياء فى الستينيات وبدون شك فإن الأمر يتطلب أن ننتظر حتى عام ٢٠٢٠ أو ما بعدها حتى يمكننا أن نعرف يقينا المسار الصحيح للتقدم الذى سوف يقودنا إلى القوة الشاملة وسط خضم الاضطراب الحالى فى بحوث القوة الفائقة. توجد مسارات كثيرة حاليًا يتبعها العلماء وسوف نبتعد عن أن نصف أى منها بأنها " الأحسن" أو "الحقيقى"، فإن أى باحث حاول ذلك فى الستينيات ما كان ليلتقط نظريات المقياس الموضعى اللاتبادلية ويركز عليها، ناهيك عن فكرة أن البروتونات والنيوترونات مركبة من جسيمات أخرى. ولكننى سوف أحاول أن أستعرض الخطوط العريضة للأفكار الأساسية الآن من ناحية المبادئ الأساسية للتماثل وعدم التغيير المقياسى. هذه الأفكار قد تضم عددًا من النظريات التفصيلية، ونأمل أن تكون إحداها هى التى سوف تنجح فى وصف العالم الحقيقى. كما أننى سوف أوضح لك على الأقل ملامح الفكرة التى يعتقد كثير من الفيزيائيين أنها سوف تكون المحور الرئيسى فى البحث عن القوة الشاملة فى نهاية القرن العشرين. وإذا ما كانت النظريات التى تعد فى المقدمة فى المرحلة الأخيرة من السباق سوف تستمر أو سوف

تسقط فى منتصف الطريق. إن الماضى يؤكد لنا أن الأفكار البسيطة والقوية مثل التماثل هى التى تساعد على تمييز النظريات الجيدة من النظريات السيئة.

لتوضيح المنظور العام، تعتبر نظرية "ك أ د "QED" نظرية ممتازة ونظرية "القوى الكهربية - النووية الضعيفة" نظرية جيدة جداً ونظرية "ك ل د" "QCD" نظرية جيدة جداً وذلك بناء على المسائل التى تم حلها والأسئلة التى ما زالت تنتظر إجابات. ويعتبر العلماء أن التشابه النوعى (العائلى) بين النظريات هو أفضل مرشد للوصول إلى شىء ما جذرى يمكن بواسطته توحيد القوى الطبيعية فى نظرية واحدة للقوة الشاملة. المجالات الكهرومغناطيسية هى الأبسط وتحتوى على شحنة واحدة فقط. المجال النووى الضعيف يحتوى على خاصية لها قيمتان للّف النظائرى، ويوجد علاقة بين ثنائيات الكوارك مع ثنائيات اللبتونات. الكوارك تأتى فى ثلاثيات وتوصف بمجال أكثر تعقيداً. ولكن فرديات QED وثنائيات المجال النووى الضعيف وثلاثيات QCD تقوم كلها على أرضية مشتركة من المبادئ الأساسية. وقد ساعد هذا النظريتين الأوليين على الاتحاد فى نظرية واحدة ناجحة. أما الألوان فى نظرية QCD فهى مثل الشحنة فى QED فيما عدا أن لها ثلاث قيم. الجسيمات غير حاملة للشحنة الكهربية لا تتأثر بالمجال الكهرومغناطيسى، وكذلك الجسيمات التى لا تحتوى ألواناً (مثل اللبتونات) لا تتأثر بمجال QCD (المجال النووى الشديد)(*).

يحاول العديد من الفيزيائيين النظريين دفع هذه الأفكار فى نفس الاتجاه لصياغة نظرية واحدة تضم نظرية كهربية - القوة النووية الضعيفة، ونظرية QCD للقوة النووية الشديدة. معظم هذه النظريات التوحيدية تنضوى تحت نفس العائلة من النظريات متبعة فى ذلك اتجاه البحوث التى ابتكرها فى منتصف السبعينيات كل من جلاشو وزميله فى هارفارد "هوارد جورجى" هذه النظريات كل منها يتناول جسيمات فى مجموعات من خمس على سبيل المثال، إحدى هذه المجموعات تتكون من مضاد

(*) إضافة من المترجم للتوضيح.

كوارك سفلى على اختلاف ألوانها (ثلاثة) بالإضافة إلى الإلكترون والنيوترينو المناظر له. أفراد هذه المجموعات يمكن أن تتحول إلى أنوا ع أخرى بنفس طريقة التحويل التى قلبت البروتون إلى نيوترون ولون الكوارك إلى لون آخر، عن طريق إدارة مؤشر له خمسة أوضاع. ولكن هذا يتيح إمكانية تحويل اللبتون إلى كوارك و الكوارك إلى لبتون. إن النظريات الموحدة تصف تماثلا أكثر عمقًا من النظريات البسيطة، ولكن هناك ثمن يجب دفعه.

تحتاج نظرية القوى "الكهربية – النووية الضعيفة" إلى أربعة بوزونات (الفوتون) وجسيمين W وجسيم Z. أما النظريات التوحيدية الخماسية، ويرمز لها بالرمز (٥) SU فهى تحتاج إلى أربعة وعشرين بوزونـاً. أربعة منهم نحتاجهم فى النظرية الكهربية الضعيفة. وثمانية آخرون هم اللواصق التى نحتاجها فى نظرية QCD. إذن هناك ١٢ بوزونًا جديداً. تقوم بالتوسط فى تفاعلات لم تكن واردة من قبل. وهذه الجسيمات الافتراضية يرمز لها جميعًا بالرمز X للأشياء المجهولة أو الرمز Y، ويمكنها تغيير الكوارك إلى لبتونات والعكس، وتحمل شحنات ١/٣ أو ٤/٣ . ولكنها ثقيلة جداً ثقيلة لدرجة أن عمرها الافتراضى فى الكون الحالى محدود بدرجة متناهية. وهى بالتالى لا تلعب أى دور ملحوظ فى عالم الجسيمات الصغيرة.

وطبقًا لهذه النظريات، فإن ثلاثة قوى هى الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة والنووية الشديدة تتساوى شدتها عند طاقات جسيمية تصل إلى $١٠^{١٥}$ جيجا إلكترون فولت (ج أ ف). وهذا المقدار حوالى ١٠ مليون مليون مرة ضعف الطاقة التى عندها يتم توحيد القوى الكهربية والنووية الضعيفة. وهذا يناظر الكون بعد $١٠^{-٣٧}$ من الثانية من الانفجار العظيم فى درجة حرارة $١٠^{٢٩}$ كلفن (درجة مطلقة)، وهذا يعنى أن جسيمات X هى نفسها لها كتلة حوالى $١٠^{١٥}$ ج أ ف أى مليون مليون مرة ضعف الطاقة التى يمكن الوصول إليها فى تجارب التصادمات بين البروتونات وضد – البروتونات فى CERN. وحيث إنه ليس فى المنظور إيجاد هذه الظروف معمليًا، فإن العلماء يلجأون للبحث فى الكون عن دلائل وجود جسيمات X بعد الانفجار الكونى العظيم. ومن المدهش إمكانية العثور على أدلة أو تأثيرات جانبية لوجود هذه الجسيمات هنا أو هناك.

إذا افترضنا أن أحد الكوارك داخل بروتون تمكن من اقتراض طاقة كافية من خلال مبدأ عدم اليقين لصنع جسيم X افتراضى، ثم يتبادله مع كوارك آخر، فإن أحدهما سوف يتحول إلى إلكترون (بوزيترون). والكواركان المتبقيان سوف يكونان جسيم "بيون" وهكذا سوف ينحل البروتون. ولأن جسيم X ثقيل جداً، فإن فترة حياته قصيرة جداً لدرجة أنه بالكاد يمكن أن ينتقل من كوارك إلى آخر داخل البروتون فقط فى حالة ما إذا كانا على مسافة $١٠^{-٢٩}$ سم من بعضها البعض. وهذا يماثل $١٠^{٢٠}$ مرة أصغر من قطر البروتون، ومثل هذا التقارب بين الكوارك هو فى الحقيقة نادر جداً. ولكنه ممكن الحدوث من وقت لآخر، ويمكن حساب احتمالية هذا التفاعل. وقد تبين من الحسابات أنه يمكن أن يحدث للبروتون مرة كل $١٠^{١٠}$ سنة أو مرة كل $١٠^{٣٢}$ طبقًا للنظرية التى نفضلها. ولكن عمر الكون $١٠^{١٠}$ سنة، ولهذا فليس من العجيب أن نرى البروتونات موجودة ومستقرة. ومن جهة أخرى يمكن فهم الاحتمال على الوجه التالى احتمال انحلال البروتون الواحد خلال عام واحد قدره $١٠^{-٣٠}$؛ أى أنه إذا تواجد $١٠^{٣٠}$ بروتون، فإن هناك فرصة جيدة لاحتمال انحلال واحد منها (ولكنك لا تعرف من هو) خلال عام.

تم تصميم بعض التجارب لملاحظة هذا الانحلال - أى ملاحظة عدد كبير جداً من البروتونات لأشهر وسنوات لرؤية أى منها سوف ينحل. إن ألف طن من المياه تحتوى على $١٠^{٣٣}$ بروتون ومن السهل الحصول على المياه. ولهذا تجرى العديد من التجارب عدة دول حول العالم لملاحظة انحلال البراتون فى تنكات كبيرة للمياه أو كتل من الحديد. ولا توجد نتيجة واضحة وحاسمة حتى الآن سلبًا أو إيجابًا، ولكن مع مرور السنوات نقترب من النهاية المحددة لعمر البروتون ($١٠^{٣١}$ سنة)، فإن الاهتمام يتزايد بالنتيجة التى نأمل أن تنشر قريباً.

ولكن لا تجرى الأمور كلها بصورة جيدة للنظريات التوحيدية إن اتجاه البحوث الذى بدأ مع فكرة التماثل فى نظرية مقياسية قد أصبح معقداً وقبيحاً مع وجود التزايد الكبير فى أعداد البوزونات، وكذلك مع وجود اللانهايات التى يتم مواراتها بواسطة حيلة إعادة التسوية (من تحت السجادة). ومع كل قوة يتم إضافتها إلى النموذج القياسى يزيد حجم وصعوبة هذه المسألة، فتصبح ككتل ضخمة يصعب مداراتها يمكن إضافة

كوارك ولبتونات كلما أردنا ذلك مما يشير إلى وجود حاجة لآلية ما فى النظريات تحد من ذلك. ولكن الشيء المحرج حقًا أن جميع النظريات التوحيدية تتنبأ بوجود قطب مغناطيسى مفرد، ولم نجد حتى الآن فى العالم الذى نعيش فيه أى أقطاب مغناطيسية مفردة. حيث إنه يوجد عدد لا نهائى من النظريات المقياسية الممكنة، كيف نستطيع أن نعرف أن هذه النظريات بالذات هى التى سوف تخبرنا بالعالم الحقيقى. إذن ماذا سوف يحدث لو أننا رجعنا إلى الجذور بدلاً من التقدم خطوة بخطوة فى بناء منزل من أوراق اللعب أدوارًا فوق بعضها البعض؟

هذا ما قام به كل من جوليان فايس من جامعة كارلسروه وبرونو زومينو من بركلى فى جامعة كاليفورنيا عام ١٩٧٤ . تدهشنا النظريات التوحيدية بإرسائها لعلاقة بين اللبتونات و الكوارك، ولكنها ما تزال تنظر للبوزونات نظرة مختلفة عن الجسيمات المادية؛ أى على أنها مجرد حاملة للقوى المختلفة. وقد قال كل من فايس وزومينو إنه إذا كان التماثل فكرة جيدة، فلماذا لا ندرج الجميع تحت غطاء التماثل الفائق وبذلك توجد علاقة بين الفرميونات والبوزونات؟

لنقف هنا ونتدبر الأمر للحظة. التمييز بين الفرميونات و البوزونات هو الأكبر فى فيزياء الكم.البوزونات لا تتبع قانون الاستبعاد لباولى بينما الفيرميونات تتبعه، فكلاهما لا يشبهان بعضها البعض تمامًا كما يضرب المثل بالجبنة والطباشير. هل من الممكن أن تكون المادة والقوى وجهين مختلفين لعملة واحدة؟ التماثل الفائق يقول نعم هذا ممكن. كل نوع من الفيرميونات (وليس كل جسيم) له نظير بوزونى، وكل نوع من البوزونات له نظير فيرميونى. نحن إذن نرى نصف الكون فقط. كل نوع من الكوارك وهى فيرميونات لها نظير بوزونى سوف نسميه "س - كوارك". الفوتون وهو بوزون يجب أن يكون له نظير فيرميونى سوف نسميه "فوتينو" وهكذا. فى نفس الاتجاه يجب أن يكون هناك "وينو" (نظير البوزون W) "وزينو" (نظير البوزون X) و"لاصقينو" (نظير البوزون اللاصق) وكذلك "س - لبتون" . بالنسبة لعلماء الفيزياء النظرية، الإجابة جاهزة للسؤال القائل أين هذه الجسيمات؟.

سوف يقومون بتحريك عصا الرياضيات السحرية لإدخال نوع من كسر التماثل الذى ينتج عنه إعطاء هذه الجسيمات كتلاً ثقيلة جداً، حيث تظل فى الظلام عندما برد الكون بعد الانفجار الكونى العظيم.

يبدو الادعاء بوجود تماثل بين البوزونات والفيرميونات شيئًا لا يمكن تصوره بالنسبة لأى إنسان تربى وتعلم على التفرقة بين المادة والقوى، ولكن هل هى فعلاً كذلك؟ ألم نأتِ على شىء من هذا من قبل؟ تخبرنا فيزياء الكم أن الجسيمات هى أمواج فى الأساس، وأن الأمواج جسيمات. بالنسبة لعالم مثل ماكسويل من علماء القرن التاسع عشر فإن الإلكترون هو جسيم وإن الضوء هو موجات، ولكن فيزيائى العشرينات من القرن العشرين تعلموا أن الذرات تتصرف كجسيمات وأمواج وأن الضوء يتصرف كأمواج وجسيمات وهذه هى النماذج الأصلية للفيرميونات والبوزونات. هل التماثل الفائق يقوم بأى عمل غير مألوف سوى أنه يأخذ ازدواجية الجسيمات الموجات إلى نهايته المنطقية، ويقول إن ازدواجية جسيم - موجة هى نفسها ازدواجية موجة - جسيم؟ لقد ابتعدنا عن جذور المسألة فى فيزياء الكم، وانشغلنا فى الفصلين السابقين بتفصيل بعض الأحداث والتفاعلات فى عالم الذرة الداخلى كالتصادمات والتفاعلات بين الجسيمات الدقيقة الصلبة، ولهذا تبدو فكرة التماثل الفائق صادمة جدا بالنسبة لنا. كان من الممكن أن تكون فكرة التماثل الفائق مقبولة أكثر و بطريقة طبيعية إذا ما كان عقلنا مدربًا على التعامل مع الأفكار المجردة فى الفيزياء الكمية، وإذا ما كنا قد فهمنا تمامًا فكرة الحقيقة الكمية المجردة حيث لا يوجد شىء حقيقى إلا إذا ما قمنا بملاحظته. فمثلاً لا نعرف أى شىء عن وجود أو عدم وجود أى جسيم إلا فى حالة تفاعله بشكل ما مع جسيم آخر(*)، تكمن المشكلة إذن فى خيالنا المحدود. ولولا ذلك لتبينا أحد

(*) يشير المؤلف هنا إلى المثال السابق شرحه فى الفصل الأول عندما أسقطنا سيل الإلكترونات على ثقبين متقاربين، ثم استقبلنا الناتج على شاشة فلا يمكن أن نعرف أى شىء ما بين لحظة إرسال الإلكترونات إلى لحظة استقبالها، وكل ما نعرفه هو أن الإلكترون وجد بشكل ما خلال الثقبين أما إذا حاولنا وضع كاشف للإلكترونات على الثقبين، فإنه سوف يتصرف كجسيم ويمر من ثقب واحد فقط.

خواص النظرية الجديدة التى تجعلها تقف شامخة وبارزة عن كل مثيلاتها من النظريات التى تعالج "القوة الشاملة". إن الحيل الرياضية فى نظرية التماثل الفائق (SUSY)، والتى تحول البوزونات إلى فيرميونات وبالعكس، تبدو غير مألوفة، ولكنها تدخل معها وبطريقة تلقائية وحتمية فى تركيب المكان - الزمان والجاذبية.

تعتبر العمليات التماثلية(*) التى تؤدى إلى تحول البوزونات إلى فيرميونات مشابهة جداً من الناحية الرياضية للعمليات التماثلية فى نظرية النسبية العامة (نظرية أينشتاين للجاذبية). إذا أجريت تحويلات التماثل الفائق على الفيرميونات، فهى تتحول إلى نظيرها البوزونى. فالكوارك مثلا يصبح "سى - كوارك". وإذا أجريت التحويلات مرة ثانية يتحول مجدداً إلى الفيرميون الأصلى، ولكن بعد إزاحته قليلاً إلى أحد الجوانب. فتحولات التماثل الفائق لا تشمل فقط البوزونات والفيرميونات، ولكن المكان والزمان أيضًا. والنسبية العامة تخبرنا بأن الجاذبية ما هى إلا انعكاس لهندسة المكان - الزمان.

ولكن الفيزيائيين توصلوا إلى فكرة التماثل الفائق بطريقة غريبة. لقد بدأ الأمر عام ١٩٧٠ عندما اقترح يوشيرو نامبو من جامعة شيكاغو فكرة أن الجسيمات الدقيقة ليست نقط مادية، ولكنها أشياء خطية ذات بعد واحد أطلق عليها أوتار(١). وكان هذا متزامنا مع بداية النظر إلى نموذج الكوارك بطريقة جديدة فى بداية السبعينيات. ولكن نجاح نظرية الكوارك وقبولها من المجتمع العلمى غطى على فكرة نامبو التى نظر إليها العلماء على أنها منافس لنظرية الكوارك، ليست مكملة لها. الأشياء الأساسية التى كان نامبو يحاول نمذجتها لم تكن الكوارك، ولكن الهادرونات (الجسيمات مثل البروتونات

(*) Symmetry Operations هى العمليات التى تجرى على التماثل.

(١) تاريخيًا تعود الإرهاصات الأولى لنظرية الأوتار لعام ١٩٦٨ عندما كان باحثان شابان من CERN وهما جابرييل فينزيانو وماهيكو سوزوكى يحاولان إيجاد دالة رياضية يمكن استخدامها للتعبير عن تصرف الجسيمات التى تتفاعل بالقوة النووية الشديدة. فقد لاحظا كل على حدة أن إحدى الدوال التى كتبت فى القرن التاسع عشر بواسطة ليونارد أويلر وتسمى دالة بيتا لأويلر يمكنها أن تقوم بالعمل. ثم اتضح أن هذه هى الأرضية لنظرية الأوتار، ولكن نامبو هو من حول الرياضيات إلى فيزياء.

والنيوترونات، والتى تشعر بالقوة النووية الشديدة) والتى نصفها الآن على أنها تتكون من كوارك. ولهذا فإن نجاح نظرية الكوارك ترك نظرية الأوتار فى الظل، ولكن عددًا من الفيزيائيين الرياضيين استمروا فى التعامل معها على أى الحالات.

نظرية نامبو تناولت أوتارًا بطول 10^{-31} سم تتذبذب وتدور حول نفسها. واعتبرت أن خواص الجسيمات التى كان يحاول نمذجتها (الكتلة والشحنة الكهربية وغير ذلك) تناظر حالات مختلفة من تذبذب الأوتار على حد تعبير نامبو. تمامًا مثل نغمات موسيقية مختلفة تصدر من أوتار الجيتار، كما أن هذه الأوتار تتذبذب فى عوالم ذات أبعاد أكثر من الثلاثة أبعاد المألوفة لنا بالإضافة إلى بعد الزمن الرابع - وستأتى على هذا بعد قليل.

ولكن أصبح الوضع محرجًا عندما أجريت الحسابات بدقة؛ حيث تبين أن هذه الأوتار تعبر عن قيمة للَّف تساوى رقم صحيح بالمفهوم الوارد فى فيزياء الكم. ولكن فقط البوزونات هى التى لها لف بقيم صحيحة فى حين أن الهدف من نظرية الأوتار أن تعبر عن الفيرميونات التى لها لف بقيم صحيحة زائد نصف. عندئذ وجد بيير رامون من جامعة فلوريدا طريقة لحل هذه المشكلة. حيث وجد طريقة لمعالجة معادلات نامبو لتشمل أوتارًا لها لف عدد صحيح ونصف (فيرميونات)، ولكن هذه الأوتار الفيرميونية يمكنها من خلال المعادلات أن تنضم فى أزواج ليصبح لها لف بقيمة صحيحة (بوزونات). جون شفارتز من برينستون وجويل شيرك من كالتك والفيزيائى الفرنسى أندريه نيفيو حولوا هذه الأفكار إلى نظرية رياضية متكاملة تصف الأوتار ذات اللّف، وتعبر عن كل من البوزونات والفيرميونات، ولكنها تتطلب أن تتذبذب الأوتار فى فضاء ذى عشرة أبعاد. ويرجع الفضل إلى شيرك عام ١٩٧٦ فى توضيح أن البوزونات والفيرميونات تنتج من نظرية الأوتار هذه على قدم المساواة؛ أى أن لكل نوع من البوزونات فيرميونًا متاظرًا، ولكل نوع من الفيرميونات بوزونًا مناظرًا، وهكذا ولدت نظرية التماثل الفائق.

توجد طريقة مهمة لفهم كل هذا وهى التى أوضحها "ويتن" أحد اللاعبين الأساسيين فى بحوث التماثل الفائق فى التسعينيات. البوزونات هى أشياء يمكن التعبير عن

خصائصها من خلال علاقات تبادلية مألوفة مثل حاصل ضرب أ × ب تساوى حاصل ضرب ب × أ. أما الفيرميونات فهى لا تتبع هذا المسلك فهى غير تبادلية[٢]. والرياضة التى تعبر عنها نجدها فى ميكانيكا الكم، وليست فى الميكانيكا التقليدية لنيوتن. إذن تعتمد دراسة الفيرميونات على فيزياء الكم بينما البوزونات كلاسيكية بطبيعتها. تقوم فكرة التماثل الفائق على تحديث مفهومنا للفضاء المكانى - الزمانى ليشمل التعبير عن كل من البوزونات و الفيرميونات. وعلى هذا فهى تحدث نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، وهى نظريته الأولى للمكان والزمان بجعلها متوافقة مع ميكانيكا الكم.

هذه النظرة العميقة لاقت الاستحسان عام ١٩٧٦، وكانت الخطوة التالية هى البحث عن طريقة لإدخال الجاذبية فى المنظومة، وتحديث نظرية النسبية العامة، وهى نظرية أينشتاين الثانية فى المكان والزمان. كان هذا ليعجل بتأسيس نظرية الأوتار عقداً من الزمان. ولكن شيئًا من هذا لم يحدث - على الرغم من أن موضوع الجاذبية كان يشغل بال عديد من الفيزيائيين فى نهاية السبعينيات. فى ذلك الوقت اعتقدوا أن الخطوة التالية تكمن فى تمديد نظرية التماثل الفائق لتشمل الجاذبية فى نموذج رياضى يسمى الجاذبية الفائقة وذلك دون اللجوء إلى فكرة الأوتار على الإطلاق.

تقريبًا عندما ظهرت فكرة التماثل الفائق على المسرح، واحتلت الاهتمام فى الأوساط العلمية توارت فكرة الأوتار وأهملت. لم ينظر أغلب الفيزيائيين إليها إلا على أنها طريق فرعى فى الفيزياء. وقد توارت تمامًا بحلول عام ١٩٧٦ بظهور نموذج الكوارك. بمجرد استقرار فكرة التماثل الفائق فى أذهان الفيزيائيين كان من السهل إدماجها مع النموذج القياسى لعالم الجسيمات الدقيقة كما شرحنا سابقًا. ولقد درست أجيال عديدة من الطلاب بعد ١٩٧٦ التماثل الفائق دون أى ذكر للأوتار على الإطلاق. وهكذا تقدمت الفيزياء للأمام مخلفة وراءها نظرية الأوتار. ولم يستمر بالعمل فى مجال الأوتار سوى جون شفارتز ومن لندن مايكل جرين (كان شيرك قد توفى فى سن صغيرة، ولم يشارك فى البحوث).

---

(٢) فى الحقيقة هى غير تبادلية بشكل خاص يسمى رياضياً عكس التبادلية.

مع ذبول نظرية الأوتار، فإن خليفتها نظرية التماثل الفائق ازدهرت وتبنى مجموعة من العلماء مهمة البناء النظرى لأفكار التماثل الفائق (SUSY). متجهين فى ذلك اتجاهات متعددة. أحدها التعبير عن نظريات التوحيد الشاملة من خلال التماثل الفائق SUSY، وتسمى هذه النظريات "SUSY" "GUT"، وأخرى تركز على الجاذبية - الجاذبية الفائقة، التى تأخذ أشكالاً مختلفة تتشابه فى الملامح العامة، ولكنها تختلف فى التفاصيل. ولكن الشىء المهم لكل نماذج الجاذبية الفائقة أن كل منها تحدد رقماً مختلفاً لعدد أنواع الجسيمات فى الكون - عدد اللبتونات وعدد الفوتينوات وعدد الكوارك وهكذا - بدلاً من التكاثر اللانهائى لإعدادها طبقًا للنظريات التوحيدية GUT الأقدم. حتى الآن لم ينجح أحد فى التوفيق بين الأعداد المسموح بها فى هذه النظريات، وما نشاهده فى العالم الحقيقى. ولكن هذه تفصيلة تعد صغيرة إذا ما قورنت بالعدد اللانهائى لأنواع الجسيمات. أحد النماذج المطروحة لنظريات الجاذبية الفائقة تسمى "ن = ٨" ويقول مؤيدوها إنها قادرة على تفسير كل شىء ، القوى و المادة (الجسيمات المادية) وهندسة الفراغ المكانى - الزمانى فى نموذج واحد. على أن أهم شىء فى نظرية **"الجاذبية الفائقة ن = ٨"** أنها لا تعانى من مشكلة اللانهاية ولا تحتاج إلى إعادة تسوية. إن نظرية "ن = ٨" تجيب إجابات محددة لكل الأسئلة التى يسألها الفيزيائيون. إنها نظرية "قوى شاملة" حقيقة.

ولكن أكبر ألغاز نظرية الجاذبية الفائقة أنها تحتاج إلى أحد عشر بعداً فى الفراغ الذى تعمل فيه. أين هذه الأبعاد فى العالم الذى نراه؟ لقد ذكرتنا النجاحات التى تحققت فى السبعينيات والثمانينيات لإيجاد وسيلة مبشرة للجمع بين الجاذبية والفراغ المكانى والزمانى وفيزياء الجسيمات - بأنه إذا رجعنا إلى العشرينيات من القرن العشرين لوجدنا محاولات للتعبير عن كل القوى الطبيعية من خلال انحناءات هندسة الفراغ الزمانى - المكانى بنفس الطريقة كما فى نظرية النسبية العامة لأينشتاين. ولكن كما يبدو بصفة عامة أن هذه الطريقة لم تؤد فقط إلى أبعاد أكثر من الأبعاد الأربعة المعروفة، ولكنها تشتمل أيضاً على حيلة رشيقة لإخفائهم عن أنظارنا.

الأبعاد المتعددة للحقيقة

في عام ١٩١٩ كان تيودور كالوزا – وهو باحث مغمور في جامعة كونيجزبرج الألمانية[٣] – يجلس في مكتبه يبحث في تداعيات نظرية النسبية العامة التي نشرها أينشتاين قبل أربعة أعوام. والتي كانت على وشك أن يتم إثباتها عمليًا بطريقة درامية من خلال دراسة انحناء الضوء أثناء كسوف الشمس بواسطة العالم أرثر أدينجتون، وكان ابنه تيودور الصغير ذو التسعة أعوام يجلس على الأرض يلعب في هدوء عندما توقف تيودور الأب فجأة عن العمل، وجلس صامتًا لعدة ثوانٍ محدقًا في الأوراق التي أمامه المليئة بالمعادلات التي كان يعمل عليها. ثم بدأ يصفر بهدوء وضرب المنضدة أمامه بكلتا يديه بشدة ثم وقف. وبعد لحظة ثانية من التحديق في الأوراق على المكتب أخذ يدندن مقطوعته المحببة من موسيقى بالية فيجارو، ثم بدأ يتمشى في الحجرة.

كان هذا التصرف غير طبيعي لتيودور الأب حتى إن الصورة نقشت في عقل تيودور الابن منذ ذلك التاريخ وقام بروايتها بانفعال شديد بعد ست وستوين عامًا أمام تليفزيون BBC[٤] كان السبب وراء تصرف والده غير الطبيعي هو اكتشاف يعتبر الآن في قلب الأبحاث عن طبيعة الكون بعد أن ظل هذا الاكتشاف عقودًا في الظلام. بينما كان كالوزا يحاول إعادة صياغة معادلات أينشتاين التي تصف قوى الجاذبية من خلال الانحناءات في فراغ رباعي الأبعاد ليشمل المكان والزمان، عندما سأل نفسه كعالم رياضيات كيف تبدو المعادلات في فراغ خماسي الأبعاد. وجد كالوزا أن كتابة المعادلات في فراغ خماسي الأبعاد يعبر عن مجال الجاذبية كما كان في الفراغ الرباعي الأبعاد، ولكنه يضم أيضًا مجموعة من معادلات المجال الأخرى التي تصف قوة أخرى. واللحظة التي خلدها ذهن كالوزا الصغير كانت اللحظة التي تبين فيها كالوزا الأب أن معادلات المجال الأخرى مألوفة لديه لقد كانت معادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية.

(٣) تسمى البلد الآن كالينجراد في جمهورية روسيا.

(٤) برنامج BBC TV's programs Horizone programme "what Eienstein never knew" وأذيع عام ١٩٨٥ .

وهكذا وحد كالوزا ما بين الجاذبية والكهرومغناطيسية فى صياغة واحدة على حساب إضافة بعد خامس للكون؛ أى أن الكهرومغناطيسية هى الجاذبية، ولكن فى بعد خامس.

لسوء الحظ لا يوجد دليل على وجود بعد خامس للكون على الرغم من أن أينشتاين لم يجد صعوبة فى إضافة بعد الزمان إلى أبعاد الكون الثلاثة المعروفة. ومع هذا، فإن اكتشاف كالوزا كان صادمًا ومهمًا. فى ذلك الوقت لم يكن باحث صغير مثل كالوزا ليستطيع أن ينشر اكتشاف جديد كهذا فجأة. أما الآن فإذا كان لديك فكرة براقة فما عليك إلا كتابتها على صورة بحث علمى وإرسالها إلى مجلة من المجلات المتخصصة فى النشر العلمى. سوف تقوم المجلة بإرسالها إلى محكم أو أكثر لتقييمها قبل اتخاذ القرار بنشرها من عدمه. ولكن فى العشرينيات من القرن العشرين جرت العادة أن يرسل المؤلف مباشرة بحثه إلى أحد كبار العلماء لقراءته، وإذا ما اقتنع به يرسله إلى الجهة التى تقوم بنشر مع توصيته بالنشر. وعلى هذا أرسل كالوزا نتائجه إلى أينشتاين.

أعجب أينشتاين منذ البداية بالفكرة وتحمس لها، وكتب لكالوزا فى أبريل ١٩١٩ أن هذه الفكرة لم تخطر على باله مطلقًا وقال "من النظرة الأولى أعجبت بفكرتك جدًا"(٥) لكنه بدأ فى مراجعة بعض التفاصيل بدقته المعروفة، ونصح كالوزا بمعالجة هذه التفاصيل قبل النشر. استمرت المراسلات ومعالجة التفاصيل الدقيقة جدًا حتى عام ١٩٢١ عندما تغير أسلوب أينشتاين فجأة ولا يعرف أحد لماذا وأرسل إلى كالوزا خطابا يخبره فيه أنه سوف يقوم بإرسال البحث للنشر. وكان أينشتاين قد بلغ شأوا كبيرًا فى ذلك الوقت، ولم يكن هناك من يستطيع أن يناقشه إذا ما أوصى بنشر بحث ما، وعلى هذا نشر البحث فى مطبوعات أكاديمية برلين هذه السنة (بالألمانية) تحت عنوان لطيف "فى مسألة توحيد القوانين الفيزيائية".

---

(٥) مأخوذة عن كتاب إبراهام بايز "Subtle is the Lord" by Abranham Pais, page 330.

كان العيب الرئيسى فى هذه النظرية (بغض النظر عن عدم إدراكنا للبعد الخامس) أنها نظرية كلاسيكية تماماً مثل النسبية العامة ولا تضع فى حسبانها نظرية الكم. ومع هذا كان هناك اهتمام كبير بها عام ١٩٢٢ كما يذكر كالوزا الابن، ولكن خبا الاهتمام بها بعد ذلك. حتى أينشتاين الذى أفنى عمره فى البحث عن نظرية موحدة للقوى يبدو أنه أهمل هو أيضاً أفكار كالوزا على الرغم من قيام الفيزيائى السويدى أوسكار كلاين عام ١٩٢٦ بإيجاد طريقة لتحويل نظرية كالوزا للتوافق مع فيزياء الكم.

إن حركة الإلكترون أو البروتون أو غيرهما يتم وصفها فى فيزياء الكم من خلال مجموعة من المعادلات ذات أربعة متغيرات. وتسمى هذه المعادلة الشهيرة "بمعادلة شرودنجر" باسم العالم النمساوى الذى صاغها. أعاد كلاين كتابة معادلة شرودنجر بخمسة متغيرات بدلاً من أربعة، وأوضح أن حلها يوضح حركة جسيم موجه يتحرك تحت تأثير كلٍ من مجال الجاذبية والمجال الكهرومغناطيسى. وتسمى كل النظريات من هذا النوع، والتى تمثل فيها المجالات هندسياً فى أبعاد أكبر من أربعة أبعاد بنظريات "كلاين – كالوز"[٦]. وهذه العائلة من النظريات وحدت بين الجاذبية والكهرومغناطيسية منذ ١٩٢٦ فى نظرية واحدة كمية.

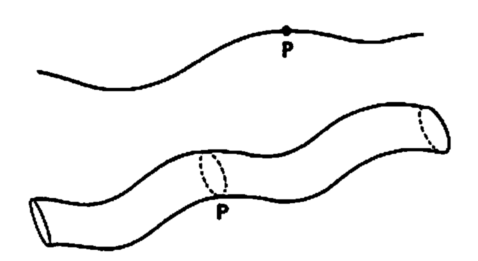
إن سبباً مهماً من أسباب إهمال أو التجاوز عن هذه النظريات حتى بعد أبحاث كلاين أنه اتضح أن هناك قوى أخرى يجب معالجتها وبهذا أصبح النموذج غير واقعى. كانت "الإجابة" كل مرة أنه يجب إدخال أبعاد جديدة لإضافة متغيرات جديدة للمعادلات حتى يمكن التعبير عن المجالات الجديدة والجسيمات الحاملة لها. وكلها توصف هندسيا تماماً كما فى الجاذبية. فالموجة الكهرومغناطيسية (الفوتون) هى ذبذبات فى البعد الخامس. وجسيم Z يمكن أن يكون ذبذبات فى البعد السادس مثلاً، وهكذا فكلما زادت القوة زادت المجالات وزادت الجسيمات الحاملة لها، و زادت الأبعاد التى تحتاجها.

---

(٦) فى الحقيقة حاول جنار نوردشتروم وذى كان يعمل فى ما يسمى الآن جامعة هلسنكى أن يوجد نظرية ذات بعد خامس لتوحيد قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية عام ١٩١٤، ولكنه فشل. ثم توصل هـ. ماندل عام ١٩٢٦ إلى نفس أفكار كالوزا الأساسية بطريقة منفصلة ودون معرفة ببحث كالوزا المنشورة عام ١٩٢١ .

لكن الأرقام ليست أسوأ من تلك الناتجة من النظريات المعتادة فى التوحيد بين القوى الأربعة مثل "الجاذبية الفائقة".

فى الحقيقة فإن الأرقام متطابقة تماماً. فالنظرية الأولى فى مجموعة الجاذبية الفائقة (وهى فى الحقيقية النظرية الجيدة الوحيدة) هى نظرية "ن = ٨". وهى نظرية تصف طريقة لربط الجسيمات من خلال تحويلات باستخدام التماثل الفائق ويغير اللّف بمقدار النصف بقيم مختلفة للّف تتراوح بين + ٢ ، - ٢[٧]. وعلى هذا فهناك ٨ قيم لف أى ثمانية تحويلات (للتماثل الفائق SUSY) يجب اعتبارها حتى تتحول من إحدى النهايات إلى الأخرى. ولهذا سميت النظرية ن = ٨ . ولكن هناك طريقة أخرى للنظر لكل هذا. كما حاول سابقاً كالوزا معرفة كيف تبدو نظرية النسبية العامة فى خمسة أبعاد. حاول الفيزيائيون النظريون إعادة صياغة نظرية الجاذبية الفائقة لمعرفة كيف تبدو فى الأبعاد المختلفة. وقد اتضح أن أبسط صورة للجاذبية الفائقة لتشمل الأربع قوى الطبيعية، وأكثرها رشاقة يجب أن تضم أحد عشر بعداً لا أكثر ولا أقل. فى أحد عشر بعداً توجد نظرية واحدة قد تكون هى النظرية المرجوة "للقوة الشاملة".



شكل (٤-٢) ما يبدو من بعيد على أنه خط ذو بعد واحد يتضح هنا أنه أنبوب ذو بعدين. كل نقطة على الخط هى فى الحقيقة دائرة صغيرة محيطة بالأنبوب. هكذا على ما يبدو كيف تعمل ظاهرة ضغط الأبعاد لإخفاء الأبعاد الإضافية التى تتطلبها بعض نظريات الجسيمات الدقيقة.

(٧) إن الجسيم الافتراضى للجاذبية (جرافيتون) له لف يساوى +٢ وهذا أكبر مقدار مسموح به.

فإذا ما اعتبرنا أحد عشر بعدًا، فإن كل تعقيدات التماثل الفائق والثمانى تحويلات تختفى ونجد أنفسنا أمام نظرية واحدة بسيطة ليس بها أكثر من تماثل واحد "ن = ١" للجاذبية الفائقة. وإذا ما تساءلنا كم عدد الأبعاد التى تتطلبها نظريات كلاين - كالوزا لتشمل كل القوى الطبيعية، نجدها أيضًا أحد عشر. أربعة معروفة للمكان والزمان وسبعة أبعاد إضافية فقط لا غير.

أثارت هذه الحقيقة العديد من الفيزيائيين، ومنهم عبد السلام الذى وصف إمكانية هندسة عالم الجسيمات والمجالات "بأنها فكرة عبقرية معجزة"(٨). ما زال هناك طريق طويل حتى نحصل على نظرية متكاملة من هذا النوع. ولكن الجمع بين نظريات كلاين - كالوزا والجاذبية الفائقة للوصول إلى نظرية جاذبية فائقة ذات أحد عشر بعدًا كان مفتاح الطريق للبحث عن SUSY، وإن كان لم يتضح أهميته الحقيقية إلا بعد ما تراكمت المعرفة لدينا الآن.

يبقى السؤال لماذا لا نرى هذه الأبعاد الإضافية؟ بالنسبة إلى الرياضيين لا مشكلة، إن كل من هذه الأبعاد الإضافية أصبح ملتفًا على نفسه بطريقة أو بأخرى بحيث أصبح غير مرئى فى عالمنا الثلاثى (الرباعى) الأبعاد. والمثال التوضيحى الذى يساق عادة فى هذا المجال هو خرطوم المياه الذى يظهر من مسافة بعيدة على أنه خط (ذو بعد واحد)، ولكن إذا ما اقتربنا فإننا نرى أنه أسطوانة ذات بعدين. وفى الحقيقة فكل نقطة على الخط هى دائرة على الأسطوانة، والأسطوانة هى تجميع كل هذه الدوائر واحدة خلف الأخرى. فى نظرية كلاين - كالوزا القديمة كل نقطة فى الفراغ المكانى - الزمانى هى حلقة قطرها $١٠^{-٣٢}$ سم ممتدة فى اتجاه ليس فوق أو تحت أو جانبًا. الصورة الحديثة أكثر تعقيدًا من ذلك فالحلقة أصبحت شيئًا يسمى "الكرة السباعية"

(٨) Horizon, op.cit.
انظر أيضًا بحث عبد السلام
Salam and J. Strathdee in Annals of Phsyics, volume 141, page 316.

(وهى كرة سباعية مضغوطة) وهى مشابهة لكرة، ولكن فى سبعة أبعاد ولكن الفكرة واحدة. ويخبرنا الرياضيون أن "الكرة السباعية" هى أبسط شكل متعدد الأبعاد موجود فى الكون الذى نشاهده بكل تعقيداته.

تتلخص هذه النظرة فى أن الكون نشأ فى أحد عشر بعدًا، ولم يكن هناك فرق بين المادة والقوة، أو بين أنواع القوى المختلفة، ولكن حالة من تواجد الطاقة الخالصة فى أحد عشر بعدًا. ثم مع بداية برودة الكون تبدأ بعض الأبعاد فى الانطواء والالتفاف على نفسها، وتظهر القوى الطبيعية كتعبير مرئى عن التجعد فى هندسة الكون، وحتى يمكن أن نفرد الأبعاد الملتفة ونلاحظها فى بهائها الأصلى، فإن الأمر يتطلب طاقة أعظم من طاقة توحيد القوى، إنه يتطلب طاقة خلق الكون نفسها.

تزخر المجلات العلمية للقرن الواحد والعشرين بتيارات هائلة مندفعة من الأفكار التى تتردد هنا وهناك فى محاولات لإيجاد الطريقة الصحيحة للوصول إلى النظرية الواحدة للقوى الكونية وفهم أصل المادة والكون. إن أكثر النظريات إثارة كما سوف نفصل لاحقًا تعتبر أن الجسيمات ليست نقط مادية، ولكنها أوتار ذات بعد واحد تتحرك فى فراغ ذى عشرة أبعاد، من بينها المكان والزمان. وتسمى هذه النظريات نظريات "الأوتار الفائقة" إن عالما مثل "ستيفن هوكينج" (وهو أحد أهم مناصرى نظرية "الجاذبية الفائقة" "ن = ٨" وهو القائل إنها سوف تكون نهاية الفيزياء؛ لأنها سوف تجيب عن كل تساؤلات الفيزيائيين) يرى أفكار كلاين - كالوزًا على أنها تؤدى إلى طريق مسدود.

يعجب الفيزيائيون بأفكار كلاين - كالوزا فى الجاذبية الفائقة والتماثل الفائق SUSY ليس لأنه يوجد إثبات عملى لها، ولكن لأنها كنظرية رائعة متسقة مع بعضها. وقد قال أينشتاين ذات مرة عن نظرية النسبية العامة إنها شديدة الروعة لدرجة أنها يجب أن تكون حقيقة وصحيحة. وكان كالوزا ليؤيد هذا الرأى لو كان ما زال حيًا. إن ابنه يمكن أن يحكى كيف علم تيودور كالوزا الأب نفسه السباحة من خلال قراءة الكتب. بعدما قرأ

كتابًا عن السباحة واستوعبه تمامًا واقتنع بصحة ما جاء به، أخذ العائلة إلى بحيرة قريبة وقفز فى الماء، وأخذ يطبق ما جاء بالكتاب فسبح حوالى خمسين مترًا ذهابًا ثم خمسين مترا إيابا، وهكذا أثبت أن النظرية صحيحة. للأسف ليس لدينا بحيرة تصلح لأن نقذف إليها بأفكار كلاين - كالوزا لنرى إن كانت سوف تطفو أم تغرق وكما قال عبد السلام مرة: كل ما استطيع قوله إننى أتمنى أن تكون النظرية صحيحة.

ولكن ظهر ما يمكن أن يؤدى إلى تدمير النظرية؛ حيث تبين أنه حتى يمكن إدراج اللف (المغزلى) إلى هذه النظرية يجب أن يكون عدد الأبعاد التى تتحرك فيها الأوتار زوجيًا. وكما لاحظنا فإن عدد الأبعاد الواردة بالنظرية أحد عشر وهو رقم فردى. وعلى هذا عكف الفيزيائيون على إعداد نظرية جديدة تأخذ فى الاعتبار التماثل الفائق وفكرة الأبعاد المتعددة وأفكار أخرى.

الأوتار تربط الأشياء

هناك نظريتان مهمتان تمثلان علامات بارزة فى طريق البحث عن النظرية الشاملة للقوى الطبيعية فى القرن العشرين. الأولى هى نظرية النسبية العامة التى تربط بين قوى الجاذبية وهندسة الفراغ المكانى - الزمانى. وهى تقول لنا إنهما يجب أن يعالجا كوحدة واحدة "الزمكان" (المكانى - الزمانى)؛ حيث الزمان هو البعد الرابع للأبعاد الثلاثة للمكان كما تخبرنا بأن الاختلالات فى هندسة الزمكان هى المسئولة عما نشاهده ونعتبره قوى الجاذبية. والنظرية الثانية هى فيزياء الكم، وهى النظرية التى قدمت شرحًا لعالم الذرات والجسيمات. وتوجد نظريات كمية تشرح وتصف كل من القوى الثلاث الأخرى (بخلاف الجاذبية) على حدة. لإيجاد نظرية واحدة شاملة تشرح الكون بمكوناته (النظرية الشاملة)، فإنها يجب أن تجمع نظرية النسبية العامة تحت مظلة النظريات الكمية. وهذا يعنى فى المقام الأول أن الزمكان (الفراغ المكانى - الزمانى) يجب أن يتكون على المستوى الصغير جدًا من قيم منفصلة لا يمكن تجزئتها (كمات)

بدلاً من أن يكون الزمان والمكان مستمرين(*). عند تطوير نظرية الأوتار إلى ما يسمى بنظرية الأوتار الفائقة فإن معالجة قوى الجاذبية نتجت بشكل طبيعى من خلال المعالجة الكمية ولكن الأمر تطلب العديد من السنوات حتى تخرج الجاذبية من بين معادلات نظرية الأوتار الفائقة.

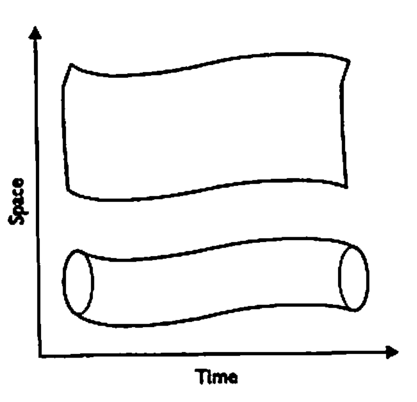
ظهرت نظرية الأوتار فى منتصف الثمانينيات بعد معالجة رياضية قام بها كل من جون شفارتز ومايكل جرين. بدءا العمل معًا فى نهاية السبعينيات بعد أن التقيا فى مؤتمر فى CERN؛ حيث اكتشفا أنهما بخلاف العديد من الباحثين الدارسين لفيزياء الجسيمات مهتمين بفكرة الأوتار، وبدأت نتائج تعاونهما تظهر فى الحال. حيث تبين أن الخطوة الأولى كانت إدراك أن المطلوب هو الوصول إلى نظرية تشرح كل شىء جميع القوى وجميع الجسيمات، وليس فقط الهادرونات. وفى هذه النظرية، فإن الأوتار يجب أن تكون صغيرة جداً وأصغر كثيراً من أوتار نامبو التى صممت لتناسب الهادرونات. وحتى بدون معرفة كيف سيتم تطوير نظرية الأوتار فقد كان لدى كل من شفارتز و جرين تصور عن طول الأوتار المطلوبة حتى يمكن دمج الجاذبية فى هذه النظرية الشاملة. تتأثر الجاذبية بشدة خلال معالجتها من خلال نظرية الكم فى أبعاد تصل إلى ١٠-٣٣ سم (١٠-٣٥ متر)، وهى المسافات التى تتأثر فيها هندسة المكان - الزمان بشدة بمبدأ عدم اليقين(٩) ومن هنا استطاعت هذه النظرية الجديدة للأوتار أن تبنى التماثل الفائق داخلها.

(*) فكرة فيزياء الكم الأساسية أن الطاقة ليست متصلة ولكن تتكون من كمات منفصلة من الطاقة، وهى ما سمى "الفوتون"، وإذا أردنا أن تشمل هذه النظرية الزمان والمكان فهذا يعنى أنه توجد قيمة صغرى للزمن لا يمكن تجزئة الزمن أصغر منها، ولكن تتكون الثانية مثلاً من عدد كبير جداً من هذه الوحدات الصغيرة. ونفس الشىء بالنسبة للمكان، فالمتر على سبيل المثال يتكون من عدد كبير جداً من وحدات المسافة الصغرى التى لا يمكن تجزئتها.

(٩) تعتمد المسافة التى تكون عندها التأثيرات الكمية مهمة بالنسبة لقوة ما على شدة هذه القوة، وتصبح التأثيرات الكمية صاحبة التأثير الأكبر للجاذبية فى هذه المسافة الصغيرة جداً، لأن قوة الجاذبية ضعيفة جداً وهى الأضعف من بين القوى الأربع عروفة. ومن خلال شدة قوة الجاذبية (وأساس ثابت الجاذبية العام) استطاع الفيزيائيون الوصول إلى المسافة الكمية المؤثرة للجاذبية.

شمل النموذج الأول لنظرية الأوتار لشفارتز وجرين عام ١٩٨٠ على أوتار مفتوحة الطرفين تتذبذب فى فراغ ذى عشرة أبعاد يمكنها الترابط بينهم وكسر هذا الترابط. ظاهريًا تبدو هذه النظرية أنها ليست أكثر من نموذج منكمش لنظرية نامبو للأوتار. ولكنها ذهبت إلى ما هو أبعد من ذلك؛ حيث اشتملت على حالات خاصة للأوتار تناظر كل الجسيمات وكل المجالات المعروفة (من ناحية المبدأ على الأقل أما الحسابات التفصيلية فهو موضوع أخر)، وتشمل كذلك كل أنواع التماثل المعروفة التى تؤثر على الفيرميونات والبوزونات والتماثل الفائق؛ أى أنها شملت كل الجسيمات والمجالات المعروفة عدا الجاذبية، على الرغم من كل المحاولات ما زالت الجاذبية عصية على الانضواء تحت نظرية الأوتار.

على أى الأحوال، فإن هذا النموذج المبكر للنظرية جهز مسرح الأحداث لما هو أت بعد ذلك. الفكرة الرئيسية فى كل نظريات الأوتار هى أن التصور الكلاسيكى للجسيمات على أنها نقط مادية (بما فى ذلك اللبتونات والكوارك) لم يعد صالحًا ويجب أن يحل محله فكرة أن الجسيمات تتكون من أشياء طولية (لها بعد واحد) تسمى الأوتار وطول هذه الأوتار فى حدود ١٠^-٣٥^ من المتر أى أن الأمر يتطلب ١٠^٢٠^ وترًا مرصوصًا طوليًا الواحد تلو الآخر حتى نصل إلى قطر البروتون.



شكل (٤-٣) عندما يتحرك وتر مفتوح النهاية فى الفضاء المكانى - الزمانى، فإنه يرسم سطحًا مستويًا. بينما الوتر المغلق النهاية يرسم أنبوبة.

الخطوة الثانية المهمة نحو نظرية حقيقية شاملة حدثت عام ١٩٨١ عندما قام شفارتز وجرين بتغيير مسار القصة. عرفت نظرية الأوتار المفتوحة بالنوع الأول (نظرية الأوتار I)، أما النظرية الجديدة (نظرية الأوتار المغلقة) فعرفت بالنوع الثانى (نظرية الأوتار II) فتأخذ فى الاعتبار الأوتار الحلقية ذات النهايات المقفولة. نظرية الأوتار I تحتوى على أوتار مفتوحة ونظرية الأوتار II تحتوى فقط على أوتار مقفولة (حلقية). فى صياغة بالغة الدقة والأناقة تمثل الفيرميونات بذبذبات تتحرك على طول الوتر المغلق فى أحد الاتجاهات بينما البوزونات تمثلها ذبذبات تتحرك فى الاتجاه المضاد مما يوضح قوة وتأثير التماثل الفائق. تتميز الأوتار المغلقة عن الأوتار المفتوحة بعدة مميزات ليس أقلها أنها تتجنب مشكلة اللانهاية التى تظهر فى نموذج الأوتار المفتوحة، والتى سببت صداعًا لفيزياء الجسيمات الدقيقة، ولكن نظرية النوع الثانى (الأوتار المغلقة) لها مشاكلها، ولم تثبت أنها قادرة (فى ذلك الوقت) على التعبير عن كل أنواع الجسيمات المعروفة.

فى عام ١٩٨٢ ظهرت سحابة أخرى فى الأفق فقد اكتشف كلٌ من إدوارد ويتون ولويس الفاريز - جوميه أن حيلة اختزال الأبعاد التى اقترحها كلاين - كالوزا(*) تعمل بشكل جيد، وينتج عنها التعبير عن القوى الطبيعية الأربع بالطريقة الصحيحة والمطابقة للملاحظات اليومية فقط إذا بدأنا الكون متعدد الأبعاد قبل التصغير بعدد فردى للأبعاد. هذا الاكتشاف جعل العلماء يهتمون بنظرية الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا أكثر من ذى قبل. كما أوقع نظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة فى مشاكل صعبة. على أن هذا لم يمنع العلماء من العمل على النظريتين، وإن كان قد أضافوا شيئًا جديدًا للتفكير فيه.

كانت الخطوة التالية هى خطوة للوراء. لقد تمت مراجعة لنظرية الأوتار المفتوحة (النوع الأول) حيث لم تنل نظرية النوع الثانى رضا كل من شفارتز وجرين.

(*) اختزال الأبعاد هى الحيلة التى بموجبها كما سبق شرحها تلتف الأبعاد الإضافية وتلتوى على نفسها بحيث لا يتبقى سوى ثلاثة أبعاد للمكان وبعدُ الزمان وهو ما يمكننا مشاهدته.

وكانت المهمة الأولى هي معالجة النظرية من داء اللانهاية العضال، وكانت المشكلة أنه يوجد العديد من التنويعات المختلفة للنظرية، وكلها تعانى من اللانهاية بالإضافة إلى بعض النتائج الشاذة التى لا تتفق مع التجارب والمشاهدات العملية، وخاصة فيما يخص قوانين البقاء؛ فمثلاً فى أكثر من صورة للنظرية لا تخضع الشحنات الكهربية لقانون البقاء فيمكن أن تظهر الشحنة الكهربية من لا شيء وأن تختفى وتتلاشى أيضاً.

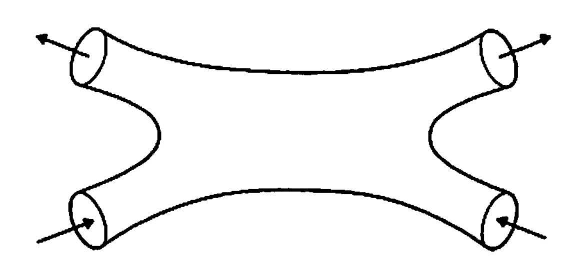
وجد شفارتز وجرين عام ١٩٨٤ أنه يوجد شكل واحد فقط من أشكال التماثل ويسمى (32) SO الذى عند استخدامه مع النوع الأول لنظرية الأوتار، فإنه يمحى كل مشكلات اللانهاية والنتائج الشاذة. وهكذا حصلا على نظرية واحدة خالية من مشكلات اللانهاية، والتى تصلح لأن تكون مرشحة للنظرية التوحيدية لكل القوى والجسيمات وعند هذا بدأ الفيزيائيون الاهتمام بنظرية الأوتار مرة أخرى.

إحدى الفرق البحثية التى استثارها نجاح جرين و شفارتز عام ١٩٨٤ كانت برئاسة دافيد جروس وثلاثة من زملائه فى جامعة برينستون وقد سميت "رباعى الوتريات فى برينستون"، وقد بدأ هذا الرباعى فى إعادة النظر فى نظرية الأوتار المغلقة (النوع الثانى)، وحاولوا إعادة صياغتها رياضياً. ولكن لم تكن مهمتهم سهلة؛ لأن النظرية أعقد كثيراً مما أوردنا حتى الآن. تتطلب الذبذبات المصاحبة للفيرميونات عشرة أبعاد كما أوردنا. ولكن ذبذبات البوزونات التى ظهرت فى عمل نامبو الأول (بطريقة غير مقصودة) تتطلب ستة وعشرين بعداً. وقد وجد جروس ومجموعته طريقة لاحتواء طريقتى الذبذبات هذه فى وتر مغلق واحد بحيث تتحرك الذبذبات ذات العشرة أبعاد فى اتجاه بينما تتحرك ذبذبات الستة والعشرين بعداً فى الاتجاه المضاد حول الحلقة المغلقة، وتسمى هذه التنويعة من النظرية بالنظرية المختلطة للأوتار(١٠).

---

(١٠) كلمة مختلطة هى ترجمة لكلمة heterotec والمشتقة من الأصل اليونانى لكلمة heterosexual أو الميل للجنس الآخر والتى تعنى فى النهاية الجمع بين شيئين مختلفين عن الأقل.

وقامت النظرية المختلطة للأوتار برأب الصدع فى نظرية الأوتار المغلقة (النوع الثانى). تتركز بعض خصائص الجسيمات (التى يطلق عليها الفيزيائيون شحنات) فى نهايات الأوتار المفتوحة (النوع الأول) (ويمكن أن تكون شحنات كهربية أو شحنات لونية فى حالة

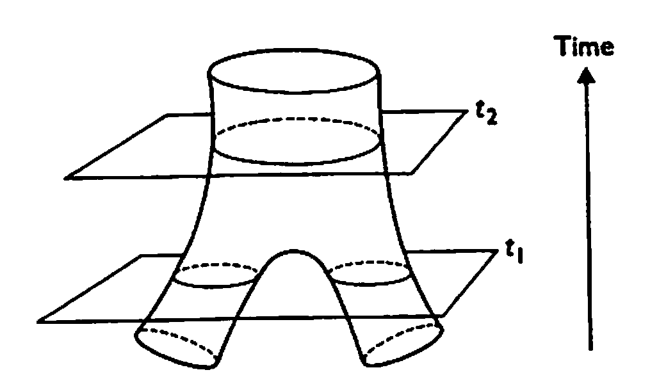


شكل (٤-٤) التفاعل بين وترين مغلقين يمكن تمثيله على مخطط فينمان. وحيث إن الأوتار ترسم شكلاً أنبوبيًا فى مخطط المكان - الزمان، فإن التفاعل لا يحدث فى نقطة، ولكن كل شىء أصبح أكبر. ولأن التفاعل لا يحدث فى نقطة، ولكن فى حيز محدود، فإن مشكلة اللانهاية لا تظهر فى نظرية الأوتار.

الكوارك أو غيرها). ولكن فى حالة الأوتار المغلقة والتى ليست لديها أطراف يكون التساؤل أين تتركز الشحنات؟. فى النظرية المختلطة أمكن معالجة الوضع بحيث تتوزع الشحنات على طول الوتر. وهذا هو الفارق الأساسى بين الأوتار المختلطة ونظريات الأوتار المغلقة التى قدمها شفارتز وجرين فى بداية الثمانينيات. ولهذا يمكنك النظر إلى النظرية المختلطة للأوتار على أنها تجميع بين نظرية الأوتار المغلقة القديمة وأول نظرية للأوتار الفائقة.

كيف يمكن لمجموعتين مختلفتين من الأبعاد التعبير عن الذبذبات فى نفس الوتر؟، الإجابة لأنه فى الذبذبات البوزونية ينكمش ستة عشر بعداً فى مجموعة، ويتبقى عشرة أبعاد مثل العشرة أبعاد المطلوبة للذبذبات الفيرميونية، حيث تنكمش ستة أبعاد من العشرة بطريقة مختلفة ويتبقى لنا الأربعة أبعاد المألوفة للزمان والمكان ويوفر العدد المتاح من الأبعاد الستة عشرة الإضافية غناءً فى النظرية، حيث يمكن الحصول على كل

تنويعات البوزونات المتعددة من الفوتونات إلى جسيمات W، Z إلى اللواصق التى لا تقارن ببساطة عالم الفيرميونات التى تتركب من عدد محدود من اللبتونات والكوارك. الأبعاد الستة عشر الإضافية فى نظرية الأوتار تعد مسئولة عن زوج من التماثلات الأساسية، وأى منها تصلح لدراسة الظواهر الفيزيائية الناتجة عن النظرية (أى اختيار آخر لمجموعة التماثل تؤدى إلى مشكلة اللانهاية) إحدى هذه المجموعات التماثلية هى مجموعة SO (32) التى ظهرت فى بحوث نظريات الأوتار المفتوحة (النوع الأول) (لاحظ أن الرقم ٣٢ هو ضعف رقم ١٦). أما المجموعة الأخرى فهى مجموعة تماثلية معروفة باسم E8 x E8 وتصف عالمين كاملين يعيشان جنبًا إلى جنب (٨ زائد ٨ لاحظ أن مجموعها ١٦) وكل من مجموعة التماثل E8 يمكنها أن تتجزأ بطريقة طبيعية إلى نفس المجموعات التماثلية التى تستخدمها فيزياء الجسيمات لوصف الكون. عندما تلتف ستة أبعاد من الأبعاد العشرة على نفسها، فإنها تكون مجموعة تماثلية تسمى E6



شكل (٤-٥) الأوتار المغلقة يمكنها الاندماج معًا حيث يندمج وتران مغلقان لتكوين وتر ثالث ويطلق على الشكل شكل البنطلون.

والتى تتجزأ بدورها إلى SU (3) x SU (2) x U (1) ولكن SU (3) هى المجموعة التماثلية المرتبطة بنظرية النموذج القياسى للكوارك واللواصق بينما SU (2) x U (1) هى المجموعة التماثلية المرتبطة بالتفاعلات الكهربية والنووية الضعيفة. كل ما هو معلوم

فى فيزياء الجسيمات الدقيقة يمكنه أن ينضوى تحت جزء واحد E_8 من المجموعة الثنائية $E_8 \times E_8$. حيث إن مجموعة واحد E_8 كافية لوصف كل شىء فى الكون. فإن هذا يعنى أننا أمام ضعف الاحتمالات الناتجة. تم كسر التماثل بين نصفى المجموعة عند بداية الكون عندما انفصلت قوة الجاذبية عن القوى الأخرى للطبيعية. ويعتقد بعض علماء الفيزياء النظرية أنه نتيجة لذلك تكون عالمان (كونان) متداخلان فى بعضهما البعض. ولكنهما يتفاعلان من خلال قوى الجاذبية - عالمنا وعالم آخر نطلق عليه عالم الظل. وسوف يكون هناك فوتون ظل وذرات ظل وربما نجوم ظل وكواكب ظل(١١) مسكونة بأناس ظل موجودين فى نفس المكان - الزمان الذى نعيش فيه، ولكنهم غير مرئيين. يمكن لأحد كواكب الظل أن يمر من خلال الأرض دونما أى تأثير إلا من خلال قوة الجاذبية - يبدو هذا كما لو كان من قصص الخيال العلمى، ولكن توجد عدة دلائل كونية على أن جزءًا كبيرًا من الكون يوجد فى حالة مادة سوداء (غير مرئية) يمكن ملاحظة تأثيراتها الجاذبية فقط. ومع هذا يمكن أيضًا أن يكون الكسر الذى حدث فى التماثل حدث بطريقة تختلف عما حدث فى عالمنا المرئى. وبالتالى لا تستطيع الحديث عن نجوم ظل أو كواكب ظل .. إلخ. كل هذا يعتبر استطراد هامشى عن القصة التى نحن بصددها (يمكن الرجوع إلى كتاب البحث عن الانفجار العظيم). ولكن هذا يعود بنا إلى الجاذبية، مرة أخرى والجاذبية هى السبب وراء هذا الاهتمام بنظريات الأوتار والتماثل الفائق الذى انفجر منذ منتصف الثمانينيات ويسمى هذا بالثورة الأولى فى نظرية الأوتار الفائقة.

وسبب هذا الاهتمام الكبير هو ظهور الجاذبية بطريقة طبيعية، وبدون افتعال فى نظرية الأوتار الفائقة. يمكنك التفكير فى الجاذبية بطريقتين: الأولى تنبع من وصف أينشتاين لانحناءات فضاء المكانى - الزمانى الذى يقودك إلى صورة موجات الجاذبية على أنها ذبذبات فى نسيج المكان - الزمانى مع جسيم مناظر للجاذبية وحامل للقوة

(١١) هذا بالإضافة إلى س لبتون ظل و س كوارك ظل وبوزينو ظل أن التماثل الفائق SUSY سوف يتم ازدواجها فى عالم الظل.

بطبيعة الحال، وله لف مقداره -٢ ويسمى جرافيتون (جسيم جاذب). كانت هذه هى الطريقة التى ظهرت تاريخيا. والطريقة الثانية تنبع من نظرية مجال كمية مبنية على جسيم صفرى الكتلة، وله لف مقداره-٢ (الجرافيتون)، ثم تنتظر لترى ما تسفر عنه المعادلات. سوف تنتهى إلى نظرية النسبية العامة لأينشتاين بعد إجراء الحسابات[١٢]. والمشكلة مع كل النظريات السابقة لنظرية الأوتار الفائقة (فيما عدا نظرية الجاذبية الفائقة ن =٨) هى أنه بإضافة جسيم عديم الكتلة وله لف -٢، فإن هذه النظريات تصيبها لعنة اللانهاية غير القابلة للمعالجة من خلال الحيلة الرياضية الخاصة بإعادة التسوية. الاكتشاف الدرامى الذى ظهر فى أواسط الثمانينيات هو أنه عندما يضع العلماء النظريون الشكل الرياضى لنظرية الأوتار الفائقة المغلقة التى يتم تفصيلها لتصف سلوك الجسيمات المعروفة، فإن وصفًا لجسيمات عديمة الكتلة ذات لف -٢ تبرز من تلقاء نفسها مع الكوارك و اللبتونات وباقى الجسيمات، والمدهش أنها تأتى بطريقة لا تصحب معها مشكلة اللانهاية المزعجة ذات الوجه القبيح. وأحد مؤسسى نظرية الأوتار الفائقة وهو جون شفارتز يشير إلى ذلك بقوله إنها "الحقيقة العميقة" والتى تقول لنا شيئًا أساسيًا بالضرورة عن كيف يعمل الكون؟.

يجب أن تشتمل نظرية الأوتار الفائقة على الجاذبية. وهى تظهر تلقائيًا بطريقة يمكن وصفها بأسلوب فيزيائى بسيط. إن أبسط أشكال الأوتار المغلقة، التى تظهر تلقائيًا من النظرية لها خواص جسيم ذى لف -٢ بوزون متجهى وهو الجسيم الحامل لقوة الجاذبية (الجرافيتون)، وهكذا تظهر الجاذبية محتوية على معادلات أينشتاين للنسبية العامة بطريقة تلقائية من نظرية الأوتار كظاهرة كمية.

شجع هذا العديد من العلماء النظريين على التعامل مع نظريات الأوتار والأوتار الفائقة منذ ١٩٨٤ . وكما كان هناك فترة زمنية حوالى عشر سنوات بين بداية الاندفاع فى السبعينيات لنظرية الأوتار (ومعها التماثل الفائق) إلى الاكتشافات المدوية

---

(١٢) أول من تحدث بهذا هو ريتشارد فينمان فى الستينيات فى سلسلة محاضراته لطلبه الدراسات العليا فى كالتك ثم نشرت محاضراته فى منتصف التسعينيات Feynman Lectures on gravity.

فى الثمانينيات للأوتار المختلطة وفكرة ظهور الجرافيتون (الجاذب) كجزء من نظرية الأوتار. كان يجب أن تمر عشر سنوات أخرى قبل أن تحدث اكتشافات أخرى مدوية. وكان يمكن أن تحدث هذه الاكتشافات مبكرًا - تذكر المعضلة التى نشأت من ضرورة وجود رقم فردى للأبعاد حتى يمكن لعملية انكماش الأبعاد أن تعمل؟ ثم جاء فى منتصف الثمانينيات بعض النظريين ومنهم مايكل دوف من جامعة تكساس A & M عندما اقترحوا أنه ليس بالضرورة أن نتعامل مع الأوتار على الإطلاق، ولكن يجب إضافة بعد للأوتار حتى تصبح ذات بعدين (أى تصبح غشاء، وليس خطًا) وهذا البعد الإضافى يجعل العشرة أبعاد الواردة فى نظرية الأوتار إحدى عشرة بعدًا، ولكن هذا البعد سرعان ما يلتف على نفسه بحيث يتصرف الغشاء كالأوتار ذات العشرة أبعاد فى نظرية الأوتار. كانت هذه الفكرة مجرد تصورات وليست نظرية متكاملة ولهذا نبذت خارج الساحة فى نهاية الثمانينيات. ولكنها عادت إلى الحياة كنظرية شبه كاملة فى منتصف التسعينيات. واليوم أصبحت نظرية الأغشية هى القضية الساخنة فى المدينة ويطلق عليها (نظرية - م) M-theory(١٣).

بدأت هذه النظرية على يد إدوارد ويتن وهو الآن أستاذ للفيزياء الرياضية فى معهد الدراسات المتقدمة فى برينستون فى أحد المؤتمرات عام ١٩٩٥ . كان تأثير البحث الذى قدمه قويًا جدًا ودافعًا ومحركًا للعلماء لدرجة أنه أطلق عليه "الثورة الثانية للأوتار الفائقة"، ولقد نتج عن هذا الاكتشاف أنه توجد من الناحية الرياضية عدة ثنائيات بين الإصدارات المختلفة لنظرية الأوتار؛ بمعنى أنه إذا وصف شيء ما على أنه دائرة أو كرة فى إحدى الإصدارات لنظرية الأوتار، فإنه يمكن وصف شيء آخر فى إصدار آخر بنفس الطريقة (من وجهة النظر الرياضية) ولنأخذ مثالاً، فإنه فى إحدى صياغات نظرية الأوتار وهى النوع الثانى وتسمى (type II a)، فإن وصف دائرة بنصف قطر R يكون مساويًا تمامًا فى صياغة أخرى (type II b) لوصف دائرة نصف قطرها $\frac{1}{R}$.

(١٣) صك إدوارد ويتن هذا الاسم وهو يقول إن "M" قد تعنى "سحرًا، غموضًا، أو إنشاء" طبقًا للمتذوق.
magic mystry or membranes.

ولقد أوضح "ويتن" أن وجود هذه العلاقات يلزم منها أن جميع إصدارات نظرية الأوتار هى أوجه مختلفة لنظرية واحدة.

وعلى هذا ترجع أهمية نظرية م "M-theory" وما سببته من آثار فى بداية القرن الواحد والعشرين، إلى أنها النظرية الوحيدة التى تجمع جميع القوى والجسيمات فى صياغة رياضية واحدة. وكما لاحظت، فإن نظرية الأوتار ليست لها صياغة واحدة ولكن توجد خمس صياغات مختلفة (تنويعات نظرية الأوتار) كل منها لها مزاياها وعيوبها. فتوجد نظرية شفارتز وجرين النوع الأول (type I) و يوجد النوع الثانى (type II) بتنويعتين مختلفتين كما توجد النظرية المختلطة للأوتار. وبالإضافة إلى ذلك ما زال هناك نظرية الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعداً. وهذه هى التنويعات الوحيدة التى يمكن الاعتماد عليها ويمكن إثبات ذلك رياضيًا. أما المحاولات الأخرى التى تقوم على التماثل الفائق فإنها تغرق فى مشكلة اللانهاية.

والآن هناك ستة أوجه للنظرية الشاملة وهذا يبدو كثيراً. على أنها قائمة ليست بالطويلة. لقد وفرت لنا فيزياء الجسيمات التقليدية من خلال محاولتها للوصول للنظرية الموحدة عدداً كبيراً من الاتجاهات كل منها لا يقل عن الآخر فى الأهمية. وقد كان الوصول إلى ست نظريات فقط لنختار من بينها يعتبر معجزة علمية فى الثمانينيات. والاكتشاف الكبير الذى توصلنا إليه فى أواسط التسعينيات هو أن هذه النظريات الست مرتبطة ببعضها البعض. يمكننا القول تحديداً إن هذه النظريات الست هى تعبيرات مختلفة عن "نظرية M" بطريقة مشابهة بالكيفية التى تعالج بها نظرية "القوى الكهربية – النووية الضعيفة" وهى نظرية واحدة فيما يبدو أنه قوتان منفصلتان (الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة) فى حدود الطاقات الصغرى. بالمثل "نظرية M" هى نظرية واحدة على مستوى الطاقات العالية، ولكنها تصف ما يبدو أنه ستة نماذج مختلفة على مستوى الطاقات الصغرى. وتحديداً يظهر الاختلاف بين النماذج الستة على مستوى التفاعلات النووية الضعيفة، ولكن تظهر الوحدة بينها على مستوى التفاعلات النووية الشديدة.

قال ويتن إنه على الرغم من أنه ليس صاحب الاكتشاف؛ فإنه تعلم شيئًا مدهشًا في الفيزياء، وهو أن الأوتار يمكنها أن تشرح الجاذبية الكمية. حيث يمكننا اعتبار أن نظرية الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا هي ما تؤول إليه النظرية الشاملة "نظرية -م" في أقل درجات الطاقة. بالرغم من أن اسم النظرية موجود، ولكن لا يوجد بناء رياضي كامل "لنظرية M"، ولكن توجد التنويعات أو - إذا أردت - الصور التي تنتهي إليها النظرية في الحالات الخاصة للطاقة. إن الوصول إلى التحديد الدقيق لماهية النظرية هو مشكلة كبيرة، وسوف يمكن فقط بعد ذلك لعلماء الفيزياء النظرية اختبار صلاحية النظرية عن طريق التوصل إلى التنبؤات التي تنتج عنها. على أنه من المتصور في المستقبل القريب أن نمتلك الإمكانيات لإجراء هذه الاختبارات.

قد لا نحتاج للانتظار فترة طويلة حتى نقتنع بأن "نظرية - م" هي نظرية جيدة، وأنها بالفعل النظرية المنتظرة الشاملة. مستويات الطاقة المطلوبة لاختبار "تنبؤات نظرية-م" M -theory يمكننا الحصول عليها من أحدث معجل للجسيمات، ويسمى مصادم الهادرونات الكبير. (LHC) والذي ينتظر أن يبدأ العمل به عام ٢٠٠٧(*) في CERN. وللمصادفة فإن هذا يتماشى مع النموذج الزمني للنظرية، حيث إن أهم التطورات في نظرية الأوتار حدثت في منتصف كل عقد وتكرر ذلك ثلاث مرات. منتصف السبعينيات ثم منتصف الثمانينيات ثم منتصف التسعينيات. إذا أمكن الانتهاء من النظرية في هذا العقد فإن هذا يمثل عشرين عامًا بعد الثورة الأولى لنظرية الأوتار. إن المحك الحقيقي لأي نظرية هو مقارنة تنبؤاتها بما تسفر عنه التجارب والملاحظات العملية.

وفي ذات الوقت انغمس علماء الرياضة بشكل هائل في الفيزياء الحديثة. يمكن التعبير عن حركة النقط في الزمان والمكان برسم الخطوط التي تجمع حركة هذه النقطة؛ حيث تكون المسارات أو خطوط العالم. على أن الأوتار والأغشية المتحركة سوف ترسم في الفراغ الزماني - المكاني مستويات ومجسمات مما تطلب معالجة رياضية مختلفة.

(*) تأخر إنشاء هذا المعجل، ولكن تم الانتهاء من الإنشاء في ٩ سبتمبر ٢٠٠٨ .

وقد أثبتت الطبولوجيا المتعددة الأبعاد التى قام بتطويرها عدد من الرياضيين كأفكار مجردة أن لها أهمية عملية فائقة، وكما يبدو فإن كل شخص سوف يجد شيئًا يهتم به فى نظرية الأوتار.

قد لا نحتاج للانتظار خمسة أو ستة أعوام أخرى حتى نحصل على دلائل تؤكد وجود التماثل الفائق نفسه. والعثور على جسيم واحد يحقق التماثل الفائق (SUSY) سوف يكون كافيا لإثبات أن التماثل الفائق يعبر بصورة جيدة عن العالم. وسوف يكون إيعازا قويًا بأن نظرية الأوتار الفائقة فى إحدى صورها مثل "نظرية – M" هى النظرية الشاملة المرتقبة(١٤). وبالفعل توجد بعض الدلائل العملية، وإن كانت بصورة غير مباشرة على التماثل الفائق. إذا عدنا للوراء خطوة فى طريق الأمل إلى النظرية الواحدة للقوى الأربعة بما فيها الجاذبية، سوف نجد أنه فى عام ١٩٩١ قدم لنا معجل الإلكترون البوزيترون التصادمى LEPC فى CERN دلائل جديدة، على أن فكرة التماثل الفائق التى تمثل أساس نظرية الأوتار الفائقة والنظريات الأخرى للنظرية الشاملة – تقدم لنا تفسيرًا جيدًا لسلوك الجسيمات والمجالات، وذلك إضافة إلى تأكيدها على دقة نظرية "ك ل د" QCD.

هل وجدنا التماثل الفائق SUSY ؟

إن أفضل طريق لاختبار تنبؤات التماثل الفائق قد تكون فى إيجاد النظير الفائق التماثل لعدد من الجسيمات المتاحة فى المعجلات التصادمية، مثل LEP ثم قياس وتحديد خواصها. وحيث إنه لم يتم خلق أى من هذه الجسيمات الفائقة التماثل فى المعجلات المتاحة، فيمكننا إذن أن نستنتج أن كتلتها كبيرة جدًا أكبر من الطاقات المتاحة فى المعجلات الحالية؛ أى أن لها كتل أكبر من عدة مئات جيجا إلكترون فولت

(١٤) بالفعل يوجد عدد من الادعاءات بأن جسيمات التماثل الفائق (قد تكون س إلكترون) قد أمكن ملاحظتها، ولكن كل هذه الملاحظات تنتج من تأثيرات خاطفة تحدث مرة واحدة فقط، ولم يتمكن أحد من تكرارها وقد تكون هناك أخبار جديدة فى أثناء قراءتك لهذا الكتاب.

(كتلة البروتون حوالى ١جيجا إلكترون فولت، وهى تعادل ١,٥٨ × ١٠^-٢٧ كجم). ولكن توجد وسيلة ماكرة لاختبار وجود التماثل الفائق.

تبدأ الحيلة من افتراض أن قوى الطبيعة (التى نطلق عليها أحيانًا تفاعلات) هى بالفعل متحدة عند مستوى عال جدًا من الطاقة. ثم نأخذ ملاحظاتنا وقياساتنا عن سلوك الجسيمات فى التفاعلات المختلفة (بتأثير القوى الطبيعية). ثم تستخدم طريقة الاستقراء الخارجى(*). إن الاستقراء الخارجى لجميع القوى مع زيادة الطاقة سوف يتجه إلى نقطة واحدة تتحد فيها القوى المختلفة، وذلك مع الأخذ فى الاعتبار تأثيرات التماثل الفائق. ولقد اتضح أن تأثيرات التماثل الفائق والمعالجة الواجب لها حتى نصل إلى توحيد القوى سوف تقودنا إلى معرفة خصائص جسيمات التماثل الفائق نفسها.

هذه هى التقنية المتبعة فى CERN. حيث تستخدم إحدى الخواص الفيزيائية الكمية للمجال، وهى ما يسمى ثابت المجال(**). وهو رقم مجرد ليست له وحدات فيزيائية تعرفه (مثل الطول أو الكتلة) وهو ما يحدد شدة التأثير لقوة ما. وبمقارنة ثابت المجال نستطيع أن نحدد بدقة العلاقة بين قوتين من قوى الطبيعة الأربع فمثلاً نقول إن القوة النووية الضعيفة أضعف كذا مرة من القوة النووية الشديدة، ولكن عندما قدمنا سابقًا مقارنة رقمية بين قوى الطبيعة الأربع فنحن لم نذكر أن هذه الأرقام تصلح فقط فى حالة الطاقات المنخفضة وأن شدة كل قوة تعتمد فى الحقيقة على ثابت المجال الذى تتوقف قيمته على الطاقات المتاحة فى التفاعل بين جسمين. فمثلاً ثابت المجال الكهرومغناطيسى الذى يحدد سلوك إلكترونين إذا ما اقتربا من بعضهما فى حالة الطاقات المنخفضة هو ١/١٣٧ . قد يكون هذا الرقم مألوفًا لديك إذا كنت قد درست الفيزياء فى الجامعة ويسمى أيضًا ثابت التركيب الدقيق، ولكن فى تصادمات LEP

(*) الاستقراء الخارجى ترجمة مصطلح extrapolation.

(**) ثابت المجال هو ترجمة Coupling constant وهو مرتبط بالقوة التى يمثلها المجال. فنحن نعرف دراستنا الجامعية للفيزياء أن كل قوة مرتبطة بثابت؛ فمثلاً هناك ثابت الجاذبية وثابت القوة الكهربية وما إلى ذلك وهو ضرورى لحساب القوة بين جسمين.

عندما ترتفع طاقة الإلكترونات إلى حوالى ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، فإن هذا الثابت يزداد ليصبح ١/١٢٩ . هذه الزيادة فى قيمة ثابت المجال عند زيادة الطاقة تنبأت بها نظرية النموذج القياسى فى فيزياء الجسيمات. ولهذا فالقياسات التى تمت فى LEP تؤكد أن نظرية النموذج القياسى هى فى الطريق الصحيح. ولكن النظرية لا يمكنها حساب القيمة الدقيقة لثابت المجال. (فى الحقيقة تبقى قيم ثوابت المجال لكل القوى الطبيعية أحد الأسرار الخفية التى لم تستطع أى نظرية أن تفسرها).

يتصرف ثابت المجال المرتبط بالقوة النووية الشديدة، (القوة بين الكوارك واللواصق) بطريقة عكسية فهو يتناقص مع زيادة الطاقة أى أنه يصبح أقل قيمة عند الطاقات العالية. وهنا أيضًا أثبتت القياسات هذا التصرف الذى تنبأت به النظرية. يبلغ هذا الثابت عند الطاقات المنخفضة ١٨, ٠ بينما دلت قياسات LEP فى الطاقات العالية أن قيمته أصبحت ١٢, ٠ وهذا التناقص فى قيمة ثابت المجال يتوافق مع الطريقة التى ترتبط بها الكوارك مع بعضها فالقوة بينهم تكون أضعف عندما يكونون قريبين من بعضهم البعض. ولكن إذا حاولت فصلهم فإن قوة الترابط تزداد. أما القوة الثالثة الطبيعية فهى القوة النووية الضعيفة، وهى أيضًا لها ثابت مجال تقل قيمته كلما زادت طاقة الجسيمات. وهنا تزداد الحبكة.

الجسيمات الحاملة للقوة النووية الضعيفة وهى بوزونات W ،Z كتلتها كبيرة كما شاهدنا من قبل (٨٠ جيجا إلكترون فولت كتلة جسيم W و كتله جسيم Z حوالى ٩١ جيجا إلكترون فولت). ولهذا فالانخفاض فى قيمة ثابت المجال يظهر فقط عند طاقات أكبر من الطاقة المناظرة لكتل هذه الجسيمات أى حوالى ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، وهو فى حدود إمكانيات LEP، وزيادة فى تعقيد الأمر فحيث إن التأثيرات الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة هى أوجه مختلفة للنظرية الموحدة والمسماة الكهربية النووية الضعيفة. فقد أتضح أنه من الأسهل إجراء المقارنات بين قيمتين مشتقتين من ثوابت المجالات الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة، وسوف نسميهما ثوابت المجالات المؤثرة $\alpha 2$، $\alpha 1$ حيث تزداد قيمة $\alpha 1$ مع زيادة طاقة الجسيمات المتفاعلة وتنقص قيمة $\alpha 2$ عندما تزداد طاقة الجسيمات، وبنفس الطريقة نسمى ثابت مجال التأثير النووى الشديد $\alpha 3$.

قام العلماء منذ عام ١٩٩١ فى CERN بقياس ثوابت المجالات السابق الإشارة إليها فى عدة حالات مختلفة من طاقات الجسيمات. وقاموا برسم العلاقة بين الثوابت والطاقة على هيئة ثلاثة خطوط فى شكل واحد. ثم قاموا بتمديد هذه الخطوط إلى طاقات عالية جداً لا يمكن عمليًا إجراء التجارب عندها. إذا كانت هذه القوة تتحد عند إحد مستويات الطاقة العالية جداً، فإنه من الواجب أن تتقاطع هذه الخطوط فى نقطة واحدة عند هذا المستوى من الطاقة. ولكن عندما قام علماء LEP بتمديد هذه الخطوط فإن كل اثنين منهما تقاطعا فى نقطة مما كون مثلثا صغيراً على الشكل بدلاً من أن يتقاطعوا فى نقطة واحدة عند طاقة حوالى ١٦١٠ جيجا إلكترون فولت(١٥).

ماذا يحدث لو أخذنا فى الاعتبار التماثل الفائق فى حساباتنا؟ إذا كانت جسيمات SUSY لها نفس الكتلة بشكل تقريبى، وكانت هذه الكتل أكبر من كتلة جسيم Z، فإن الاستقراء الخارجى للخطوط السابق الإشارة إليها تظل كما هو ما بين كتلة جسيم Z وحتى متوسط كتل جسيمات التماثل الفائق. ولكن عند طاقات أعلى من كتل جسيمات SUSY تحدث انحناءه عند طاقات مناظرة لكتل التماثل الفائق. ثم تمتد فى خطوط مستقيمة، بعد ذلك حيث نرجو أن تتقاطع فى نقطة عند الاتحاد الشامل للقوى. باختيار قيم مناسبة لكتل التماثل الفائق استطاع علماء CERN تمديد هذه الخطوط لتتقاطع فى نقطة. كتلة التماثل الفائق التى استنتجها العلماء أعلى من الطاقات التى يمكن الحصول عليها الآن حوالى ١٠٠٠ جيجا إلكترون فولت. ولكن هذا النبأ سار لأن معجل الجسيمات الضخم الجارى إنشاؤه فى CERN والمسمى LHC مصادم الهادرونات الكبير سوف يتمكن من توفير مثل هذه الطاقات مما يمكننا من اختبار نظرية التماثل الفائق. إذا كانت هذه الحسابات سليمة، وإذا كانت نظرية التماثل الفائق سليمة، فإنه سوف يمكننا التحقق منها عمليا قبل عام ٢٠١٠ . ماذا لو لم يمكننا العثور على

---

(١٥) لاحظ أنه يحدث خلطًا كبيراً عند غير المتخصصين. ما يقوم العلماء بتوقيعه على الرسم هو فى الحقيقة مقلوب (واحد على) ثابت المجالات. وبالتالى فإن مقلوب ثابت المجال النووى الشديد يزداد مع زيادة الطاقة.

جسيمات التماثل الفائق عند طاقات حوالى ١٠٠٠جيجا إلكترون فولت؟. حسنًا سوف نعود ثانية إلى الشكل الذى رسمناه، ونحاول بطريقة أخرى أن نجعل الخطوط تتلاقى فى نقطة. وهكذا فنحن أقرب ما نكون لنعرف إلى أى حد تكون نظرية التماثل الفائق حقيقية.

إننى متفائل. فعلى أقل تقدير إن إضافة التماثل الفائق إلى حساباتنا قد أسهم فى أن الاستقرار الخارجى لثوابت المجالات يجعلها أقرب ما تكون للاتحاد عند الطاقات العالية، بالمقارنة إذا استبعدنا التماثل الفائق Susy من الحسابات، واكتفينا بنظرية النموذج القياسى وهذا فيما يبدو خطوة جيدة. كما أنه يجدر الإشارة إلى أننا وصلنا إلى هذا باستخدام أبسط طريقة لاحتواء التماثل الفائق فى نظرية النموذج القياسى وأبسط الفروض للاتحاد الشامل بين القوى (على أن هذه النماذج البسيطة تنتج بشكل تلقائى من نظرية الأوتار الفائقة، إننى أتوقع أننا على أبواب كشف حقيقة أساسية كونية، هذه ملاحظة متفائلة استطيع أن أنهى بها قصتى فى البحث عن التماثل الفائق (SUSY).

ملحق

نظرية المجموعات للمبتدئين

نظرية المجموعات هى فرع من الرياضيات التى تبحث فى المجموعات، والتماثل رياضيًا تعرف المجموعة (مجموعة تماثل)، فهى عدد من العناصر (فئة) تسمى أ، ب، وتوجد بينها علاقات تحكمها قوانين محددة.

أولاً: إذا كان أ ، ب عنصرين فى مجموعة س، فإن حاصل الضرب أ ب يكون عنصرًا أيضًا فى المجموعة، وهذه العملية تنطبق عليها قاعدة الترابط associative أى أن

(أ ب) ج = أ (ب ج)

وهكذا

ثانيًا: لابد من وجود عنصر يسمى عنصر الوحدة، وسوف نرمز إليه بالرمز هـ؛ بحيث إن

أ هـ = أ ، ب هـ = ب

لجميع العناصر فى المجموعة

ثالثًا: كل عنصر فى المجموعة له مقلوب $أ^{-1}$ ، $ب^{-1}$ وهكذا بحيث إن حاصل ضرب العنصر فى مقلوبه يساوى الواحد. أ $أ^{-1}$ = هـ

بعض المجموعات تسمى تبادلية (أبلية) إذا كان أ ب = ب أ

فمثلاً مجموعة الأرقام الصحيحة (١، ٢، ٣،...) هى مثال للمجموعات الأبلية. بصفة عامة تتكون المجموعات من عناصر هى مصفوفات مثل قطع الشطرنج على الرقعة. إذا كانت أصغر عناصر مجموعة ما مصفوفة من عدد من الصفوف ن وعدد من الأعمدة ن (مصفوفة ن × ن) لذا تكون المجموعة ذات بعد ن.

وهكذا ظهر الرقم ٣ فى المجموعة SU (3) التى أثبتت أهمية كبرى فى نظرية الجسيمات، فهو بعد المجموعة الخاصة SU وهى اختصار (special unitary). تم تطوير نظرية المجموعات فى القرن التاسع عشر بواسطة الرياضى النرويجى سوفيس لى، ولهذا أحيانًا تسمى هذه المجموعات "بمجموعات لى". وقد ظلت هذه النظرية كفرع مغمور من الرياضيات على الرغم من استخدامها فى وصف البلورات حتى منتصف القرن العشرين. عندما استطاع شين نينج ينج وروبرت ميلز وصف التفاعل النووى الشديد من خلال مجموعات لى. وبعد ذلك وجد كل من مورای جيل - مان ويوفال نيمان منفردين أن المجموعة SU(3) تمثل أساسًا رياضيًا لوصف العلاقات بين الجسيمات الأساسية. ومنذ ذلك الحين أصبحت المجموعات التماثلية أداة أساسية يستخدمها الفيزيائيون للتعامل مع النظريات المقياسية لقوى الطبيعة. وفى هذا السياق يطلق أحيانًا على المجموعات التماثلية اسم المجموعات المقياسية.

إن أبسط مثال مجموعة تماثلية هو المجموعة المكونة من عمليات دوران الإحداثيات (خذ مثلا رسما بيانيا فى مستوى س، ص) حول نقطة تقاطع محورى السينات والصادات بشكل ما. فإذا أدرت المحاور، فإن إحداثيات النقط على الشكل تتغير بالنسبة للإحداثيات بعد الدوران، ولكن العلاقات بين هذه النقط لا تتغير. فى الحقيقة إن هذا التدريب يسمى التحويلات المقياسية. وهذا يعنى - مثلاً - أنه بينما الأرض تدور حول نفسها وحول الشمس فإن المسافة بين لندن وباريس (أو بين أى نقطتين على محيط الأرض) ثابتة لا تتغير. هكذا نشعر جميعًا فى حياتنا العملية بالتحويلات المقياسية كل لحظة يوميًا. وإذا أدرت المحاور زاوية أ ثم أدرتها زاوية ب، فإن هذا

يتساوى مع إدارتك المحاور زاوية ج حيث ج = أ + ب. وحيث إن الزوايا التى يمكن بها إدارة الإحداثيات يمكن أن تكون صغيرة جداً بالدرجة التى نختارها بدون حد وتتغير بطريقة متصلة مثل مثال دوران الأرض، فإن مجموعات الدوران هذه تسمى بالمجموعات المتصلة (لاحظ أن مجموعات SU التى تعنينا فى نظرية الجسيمات هى أيضاً مجموعات متصلة). نستنتج من حقيقة أن قوانين الفيزياء لا تتغير بعد إجراء الدوران للمحاور أن عزم الحركة الزاوى تظل قيمته ثابتة، وهى قانون بقاء العزم الزاوى، وبصفة عامة فطالما أن مجموعة تماثلية تصف ظاهرة فيزيائية، فإنه لابد من وجود قانون بقاء مرتبط بهذه الظاهرة (هذه النظرية تسمى بنظرية نويتر، وهى إحدى السمات المفيدة لنظرية المجموعات التى تستخدم لزيادة فهمنا فى سلوك الجسيمات والقوى).

لسوء الحظ فإن المجموعات التماثلية التى تستخدم لدراسة سلوك الجسيمات والقوى ليس من السهل إدراكها بطريقة محسوسة، ولكنها تخضع لذات القوانين الرياضية، إن أحد أهم سمات تطبيق نظرية المجموعات أنه بسبب وجود تماثل خفى يمكنها أن تتنبأ بأنه يوجد عدد من الجسيمات ذات الطبيعة الخاصة (الكوارك مثلاً واللواصق) يمكن وصفها بإحدى مجموعات التماثل المناسبة. على سبيل المثال المجموعة (3) SU يمكنها أن تصف الكوارك بثلاثة أنواع مختلفة من الشحنات اللونية وكذلك بثمانية أنواع من اللواصق.

أهم سمة من سمات المجموعات المهمة لفيزياء الجسيمات هى التماثل. نحن نفهم التماثل من منظور النماذج الهندسية، ولكن هذه الفكرة تم سحبها إلى عالم الكم لتصف العلاقات بين القوى والجسيمات. أتاح هذا للفيزيائيين أن يستخدموا الهندسة فى وصف الفيزياء، وبالتالى إضافة أبعاد جديدة أكثر من الزمن، وثلاثة أبعاد للمكان كلما ظهرت الحاجة إلى ذلك.

يعتبر التماثل الانعكاسى أحد أمثلة التماثل، بعض الأشكال تتميز بأن الجانب الأيمن منها يعتبر صورة فى المرآة من الجانب الأيسر. والبعض الآخر له تماثل الكرة،

إنها تبدو بدون تغيير مهما حدث لها من دوران، ولها تماثل كروى أو تسمى لا متغيرة مع الدوران.

يدخل التماثل فى بناء القوانين الطبيعية بطريقة جذرية. التماثل القائل بأن قوانين الطبيعة ثابتة ولا تتغير من مكان لآخر فى الكون (اللاتغيير الانتقالى) مناظر لقانون بقاء عزم الحركة الخطى. أما التماثل القائل إن قوانين الفيزياء ثابتة ولا تتغير فى كل الأزمان يناظر قانون بقاء الطاقة. و اللاتغير الدورانى لقوانين الفيزياء يناظر قانون بقاء عزم الحركة الزاوى.

الكثير من حالات التماثل فى فيزياء الكم أصبحت تماثلاً مكسوراً حيث يتحول وضع متماثل أساساً إلى وضع غير متماثل. المثال التقليدى هو الكرة الموضوعة على قمة تل على شكل مخروطى، وهو وضع متماثل، ولكن حينما تدحرج الكرة إلى أحد جوانب التل يصبح الوضع غير متماثل. ولكن هذا الوضع النهائى ما زال به بعض لمحات التماثل. باستخدام هذه الأفكار تمكن الفيزيائيون من اكتشاف علاقات تماثلية بين القوى الطبيعية وبين الكوارك واللبتونات، وكذلك بين الفيرميونات والبوزونات (التماثل الفائق).

يعتبر التماثل المقياسى أحد أنواع التماثل الكامنة فى قلب نظرية المجال، وهى فكرة تستخدم فى نظرية المجال لوصف المجال، بحيث إن المعادلات التى تصف المجال لا تتغير إذا ما أخضعنا جميع الجسيمات فى الفراغ لعملية ما. (ومن الممكن أن يكون هناك تماثل موضعى عندما يتم تطبيق العملية على جزء محدد فقط).

واللفظ مقياس "gauge" يعنى ببساطة "قياس" والمعنى هو أن المجالات التى لها تماثل مقياسى يمكن قياسها من نقاط مرجعية مختلفة دون أن تتأثر خواصها.

الجاذبية هى المثال التقليدى للتماثل المقياسى. تخيل كرة موضوعة على إحدى درجات السلم. فى هذا المكان لها قيمة محددة لطاقة وضع الجاذبية. وإذا ما تحركت الكرة إلى درجة أسفل من السلم، فإنها تفقد جزءاً من طاقة الوضع التى تعتمد فقط

على المسافة بين الدرجتين وشدة مجال الجاذبية. يمكنك قياس طاقة وضع الجاذبية من أى مكان تختاره، فمثلاً يمكنك اختيار سطح الأرض أو مركز الأرض كخط الأساس للقياس، كما يمكنك اختيار إحدى درجات السلم مثلاً. إذن يمكنك اتخاذ أى مكان فى العالم كخط الأساس الذى يناظر صفر طاقة الوضع، ولكن المهم أن الفرق فى طاقة الوضع بين درجتى السلم يظل دائماً ثابت القيمة مهما كان اختيارك كخط الأساس الذى تقيس منه طاقة الوضع، ولهذا فالجاذبية هى نظرية مقياسية.

كلٌ من الجاذبية والكهرومغناطيسية نظريتان مقياسيتان. وكانت متطلبات التماثل المقياسى هى أحد أهم المدخلات عند تطوير نظرية التأثير النووى الضعيف، وكذلك نظرية "ك ل د QCD" لديناميكا الكهرولونية الكمية بدلالة المجالات الكمية. والوضع أكثر تعقيداً فى نظريات المجال الكمية عنه فى الجاذبية (انظر التماثل المقياسى) ولكن يمكن تصويره بالتناظر كما فى كتاب القانون الكونى لباجل هينز(*).

طلب منا باجل أن نتخيل صفحة لا نهائية من الورق ملونة بلون رصاص بطريقة منتظمة. منتظمة ومتماثلة تماماً لدرجة أنك لا تستطيع أن تحدد أين مكانك على الصفحة الورقية إنها لا متغيرة بشكل عام. وهذا التماثل صحيح أياً ما كانت درجة اللون الرصاصى هذا أحد أمثلة التماثل المقياسى (إعادة قياس درجة اللون لا تسبب أى فرق). الآن تخيل صفحة أخرى من الورق ملونة بدرجة أخرى من اللون الرصاصى وضعت فوق الورقة الأولى. هنا التماثل قد تم كسره حيث يمكنك تحديد الأماكن المختلفة من الورق من بعضها البعض، ولكن يمكن استرجاع التماثل العام إذا وضعنا على الصفحات الملونة صفحة من البلاستيك الشفاف الذى تم معالجته ليعادل درجة لون الصفحة الورقية تحته. (أغمق عندما تكون الصفحة فاتحة وفاتح عندما تكون الصفحة غامقة)، أى أن التأثير النهائى سوف يكون استرجاع لون واحد منتظم، وبالتالى استرجاع اللاتغير العام والتماثل العام.

(*) "The Cosmic code" by Heinz Pagel.

فى المثال السابق تمثل الورقة ذات الألوان المتعددة مجالاً كميًا أما صفحة البلاستيك الشفاف التى تم طلاؤها بحيث تعادل لون الورقة، فهى تمثل مجالاً مقياسياً. ويسمى أحيانا مجال ينج - ميلز، وهما العالمان اللذان طورًا هذه الطريقة لتناسب النظرية الكمية للمجال فى الخمسينيات، ويعمل هذا المجال المقياسى على استرجاع التماثل المكسور.

والنقطة المهمة هى أن المجال اللامتغير تمامًا عمومًا لا يمكن اكتشافه؛ حيث إن قيمته ثابتة فى جميع الأنحاء. وعلى هذا تفصح المجالات عن نفسها (بالرغم من أنها موجودة باستمرار) فقط عندما ينكسر التماثل، ويكون هناك فرق من مكان لآخر. لقد قادت هذه الفكرة عن كسر التماثل فى المجالات المقياسية كل من ستيفن واينبرج وعبد السلام (كل منهما منفرداً عن الآخر) للعمل على نظرية المجالات الكهربية - النووية الضعيفة عام ١٩٦٧، والتى أفسحت الطريق أمام كل المحاولات التالية لإخراج النظرية الموحدة العامة.

الـكـتـب المهـمـة فـى الموضـوع (Bibliography)

الكتب التالية توفر خلفية علمية جيدة فى الموضوعات التى شملها هذا الكتاب. وتظل أفضل الوسائل لمواكبة التطورات العلمية السريعة هى متابعة المجلات مثل :

New Scientist, Science News and Scientific American.

Close, E, Marten M. and Sutton, C.,The Particle Explosion, OUP, Oxford, 1978.

كتاب ممتاز حول اكتشافات الجسيمات الدقيقة.

Davies, P., The Forces of Nature, Cambridge University Press, 1979.

عرض واضح للمبادئ التى تشرح تركيب العالم الداخلى للذرة، الجسيمات الدقيقة، المجالات والنظرية الكمية. الكتاب لا يتعرض للرياضة، لكنه يهتم بعرض الموضوع بطريقة شيقة، وبه تفصيلات فى التماثل ونظريات القوى الموحدة.

Davies, P., Superforce, Heinemann, London, 1984.

أفضل كتب دافيز، وهو يعرض ذات الموضوعات كالكتاب السابق، لكنه موجه للقراء غير المتخصصين فى الفيزياء. الكتاب متحرر من قيود الكتابة المدرسية للفيزياء. ويتنقل دافيز بين مجالات وموضوعات متعددة مثل ضد الجاذبية ، النظرة الشمولية للطبيعة و حتى علوم التنجيم. إذا قرأت هذا الكتاب مع الكتاب السابق سوف تعرف الحقائق المؤكدة عند الفيزيائيين، كما سوف تطل على بعض خيالاتهم الجامحة.

Feynman, R., Morinigo, F. and Wagner, W, Lectures on Gravity, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1995.

يعرض على نحو مذهل الأفكار الحديثة التى تتناول كيف يمكن أن تتوافق الجاذبية مع النظرية الكمية للمجالات التى تطورت على يد أحد أهم الفيزيائيين منذ أكثر من ثلاثين عاما.

Fritzsch, H., Quarks, Pelican, London, 1984.

المؤلف عالم ألمانى عمل مع موراى جيل - مان فى تطوير النظرية الكمية الديناميكية اللونية (نظرية الكوارك ذات الألوان. نشر الكتاب أول مرة فى ألمانيا عام ١٩٨١ ويعتبر مقدمة جيدة لفيزياء الجسيمات مع عرض النظريات التى ظهرت مع تجارب الجسيمات الدقيقة فى المعجلات خلال الستينيات والسبعينيات من القرن العشرين. يعرج الكتاب بطريقة مختصرة على نظرية توحيد المجالات الكهربية والنووية الضعيفة، ولا يتعرض للتماثل الفائق أو النظريات الكونية. ولكن إذا أردت أن تعرف عن الكوارك فهذا هو أفضل الكتب.

Glashow, S., The Charm of Physics, American Institute of Physics, New York, 1991.

كتاب ممتاز من فيزيائى حائز على جائزة نوبل يتناول نظريات التوحيد الكبرى وغيرها.

Greene, B., The Elegant Universe, Norton, New York, 1999.

Greene, B., The Fabric of the Cosmos, Norton, New York, 2004.

كتابان من مؤلف هو أحد رواد نظرية الأوتار، ويقدم رؤية شخصية لهذه النظريات.

Gribbin, J., In Search of Schrodinger's Cat, Bantam/Black Swan, New York/ London 1984.

قصة نظرية الكم ذات النجاح المذهل - برغم غرابتها الشديدة - فى وصف عالم الجسيمات الدقيقة خلال القرن العشرين. الموضوعات مثل ازدواجية الجسيمات والموجات ومبدأ اللاحتمية تم تفسيرها بطريقة سهلة القراءة.

Gribbin, J., In Search of the Big Bang (revised edition),. Penguin, London, 1984.

عرض لنظريات نشأة الكون والتماس بين فيزياء الجسيمات ونظريات بداية الكون.

Gribbin, J., Q is for Quantum, Weidenfeld, London, 1998.

دليل من أ إلى ى لعالم الجسيمات والمجالات.

Gribbin, J. and Gribbin, M., Richard Feynman: A Life in Science, Penguin, London and Plume, New York, 1997.

قصة حياة مرتبطة بكل نواحى الفيزياء من ١٩٤٠ إلى ١٩٩٠ شاملة الموضوعات التى تناولها هذا الكتاب.

Kaku, M., Parallel Worlds, Alien Lane, London, 2005.

نظرة عريضة للجوانب التأملية، وتشمل رؤية شخصية للتأثير الذى أوجدته نظرية – م على المتخصصين فى الفيزياء الرياضية.

Krauss, L., Hiding in the Mirror, Viking, New York, 2005.

كتابى المفضل من بين العديد من الكتب التى ظهرت عن نظرية الأوتار بعد ظهور كتابى هذا.

Ne'eman, Y. and Kirsh, Y, The Particle Hunters, Cambridge University Press, 1986.

القصة المثيرة لفيزياء الجسيمات منذ اكتشاف الإلكترون، وإثبات أن الذرة ليست كرة صلبة، لكنها قابلة للانشطار (منذ ما يقرب من مئة عام مضت)، حتى اكتشاف الدلائل على وجود جسيمات W و Z فى الثمانينيات هذه الاكتشافات التى تؤيد جهود العلماء فى إيجاد نظرية واحدة تجمع كل الجسيمات. هذا هو الكتاب المناسب لمعرفة المزيد عن الكوارك ، الباريونات ، اللبتونات و النيوترينو.

Pagels, H., The Cosmic Code, Michael Joseph, London, 1985.

كتاب للقارئ العادى حول ألغاز عالم الجسيمات الدقيقة لمدرس فيزياء متميز.

Pagels, H., Perfect Symmetry, Michael Joseph, London, 1982.

الكتاب الثانى للمؤلف باجل حيث يشرح الطريق الذى تسلكه البحوث نحو نظرية موحدة حتى منتصف الثمانينيات مع ربطها بنظريات نشأة الكون.

Pickering, A., Constructing Quarks, Edinburgh University Press, 1984.

Subtitled 'A sociological history of particle physics'.

كتاب للمتخصصين من الفيزيائيين ومؤرخى العلوم. لكن يمكن لأى قارئ جاد قراءته و متابعة فكرة الكوارك كمكونات أساسية للمادة. كتاب متعمق، لكنه بعيد عن الرياضيات، ويشرح مبادئ التماثل والنظريات المقياسية.

Polkinghorne, J. C., The Quantum World, Longman, London, 1984.

كتاب أنيق ومختصر من الحجم الصغير ١٠٠ صفحة . يشتمل على ملحق رياضى و كشاف للمصطلحات ويعرض لفيزياء الكم و المناقشات الفلسفية المرتبطة بها.

Rae, A., Quantum Physics: Illusion or Reality?, Cambridge University Press, 1986.

كتاب سهل القراءة يتحدث عن عالم الذرات و الجسيمات الدقيقة المذهل و الملىء. ويتناول الكتاب فيزياء الكم. كما أنه يحتوى على فصل خاص فى الديناميكا الحرارية ومتجه الزمن.

Sutton, C., The Particle Connection, Hutchinson, London, 1984.

عرض متميز للبحوث التى مهدت الطريق لاكتشاف جسيمات W و Z التى أكدت نتائج و توقعات نظرية توحيد القوى الكهرومغناطيسية والنووية الضعيفة. يعكس الكتاب رؤية الفيزياء التجريبية. هذا هو الكتاب المناسب لمعرفة كيف تعمل المعجلات والتعرف إلى الإثارة المرتبطة ببحوث فيزياء الجسيمات الدقيقة فى نهاية السبعينيات وأوائل الثمانينيات.

كـشـــاف

المؤلف فى سطور :

جون جريبين

عالم إنجليزى من مواليد ١٩٤٦. حصل على بكالوريوس العلوم فى الفيزياء عام ١٩٦٦، ثم الماجستير ثم الدكتوراه فى الفلك عام ١٩٧١ من جامعة كامبريدج، حيث عمل بها كما عمل ككاتب علمى فى العديد من المجلات العلمية من بينها نيتشر. وقد ألف العديد من الكتب العلمية واسعة الانتشار ويتميز بأسلوب سهل ورشيق.

المترجم فى سطور :

د. صلاح الدين إبراهيم حسب النبى

من رواد بحوث علوم الليزر فى مصر من مواليد ١٩٤٨ . حصل على بكالوريوس الهندسة عام ١٩٧٠، ثم درس الرياضيات والفيزياء وحصل على الماجستير فى فيزياء الليزر ثم الدكتوراه فى الاستشعار عن بعد بالليزر من جامعة اورساى بباريس. وقام بالعديد من البحوث العلمية. وقد تقلد العديد من المناصب فى المجالات الثقافية والعلمية.

التصحيح اللغوى : سوزان عبد العال
الإشـراف الفنـى : حســن كـــامل